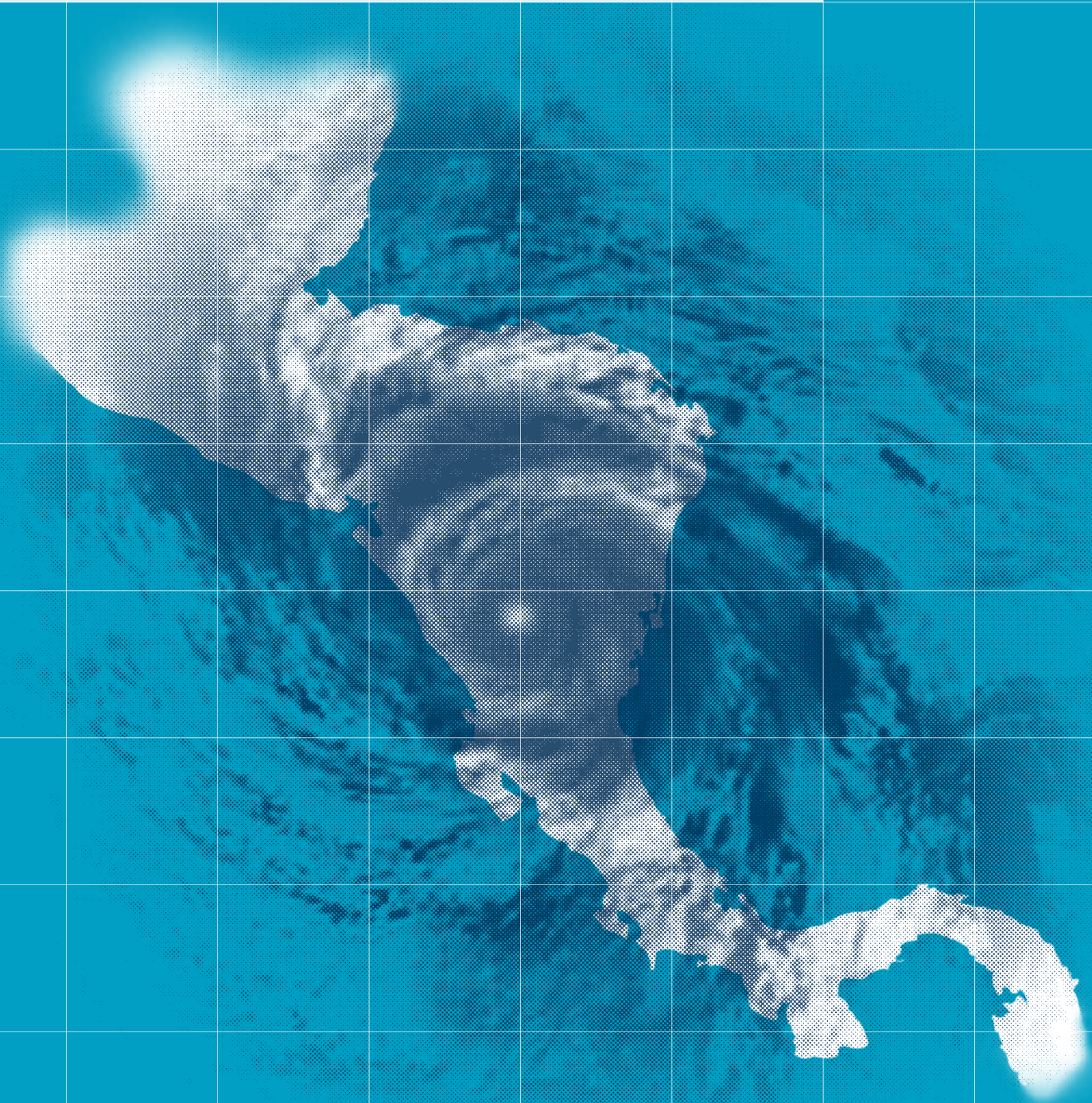


La economía del cambio climático en Centroamérica

Serie
técnica 2012

Dos casos de impactos potenciales
en la generación de hidroelectricidad



La economía del cambio climático en Centroamérica: Serie técnica
Dos casos de impactos potenciales en la generación de hidroelectricidad 2012

Alicia Bárcena
Secretaria Ejecutiva
Antonio Prado
Secretario Ejecutivo Adjunto
Hugo E. Beteta
Director
Sede Subregional de la CEPAL en México
Joseluis Samaniego
Director
División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos
y Punto focal de cambio climático de la CEPAL
Luis Miguel Galindo
Jefe de la Unidad de Cambio Climático
División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos
Julie Lennox
Punto focal de cambio climático y Jefe de la Unidad de Desarrollo Agrícola
Sede Subregional de la CEPAL en México

Esta publicación fue realizada en el marco del Convenio entre el Programa de asistencia del Ministerio para el Desarrollo Internacional del Gobierno británico (UKAID) y la Sede Subregional en México de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), y el Convenio entre la Agencia de Cooperación para el Desarrollo de Dinamarca (DANIDA) y la CEPAL dentro de la iniciativa “La economía del cambio climático en Centroamérica”.

Las opiniones expresadas en este documento son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la CEPAL y de las instituciones socias del proyecto.

Los límites y los nombres que figuran en los mapas de este documento no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

El término “dólares” se refiere a la moneda de Estados Unidos de América.

LC/MEX/L.1070

Copyright © Naciones Unidas, octubre de 2012. Todos los derechos reservados.

Los Estados miembros y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a las Naciones Unidas de tal reproducción.

Diseño de portada: José Luis Lugo.

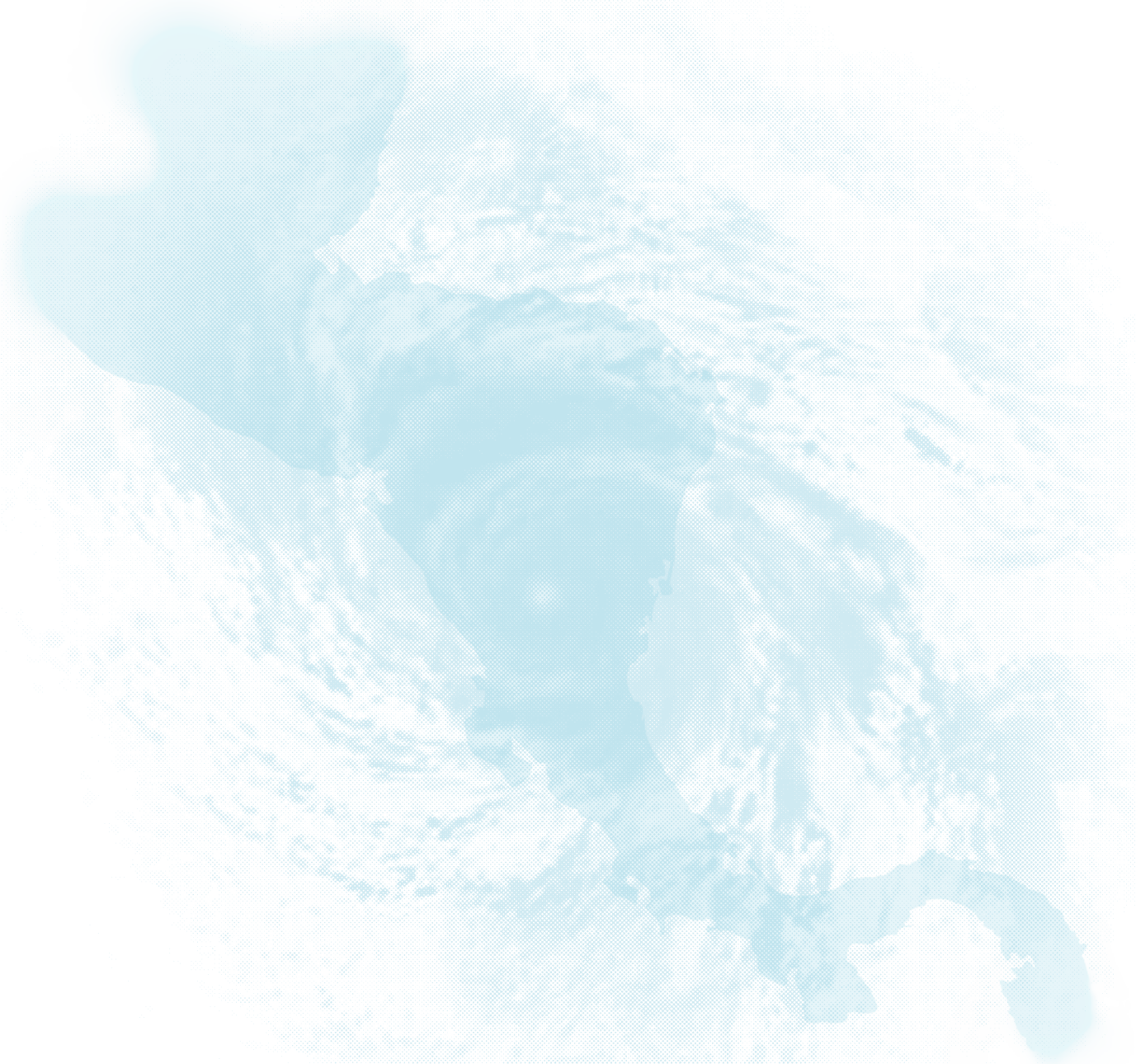
El interior de esta publicación fue impreso en papel “Recicla 100” (100% reciclado).

Impresión: Maule Ediciones.

La economía del cambio climático en Centroamérica

Serie
técnica 2012

Dos casos de impactos potenciales en la generación de hidroelectricidad



COMITÉ DIRECTOR

Ministros/as de Ambiente:

Liselle Alamilla, Ministra del Ministerio de Recursos Naturales y Medio Ambiente de Belice (MNREI); Juana Argeñal, Ministra del Ministerio de Recursos Naturales y Ambiente de Nicaragua (MARENA); René Castro, Ministro del Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones de Costa Rica (MINAET); Lucía Chandeck, Administradora General de la Autoridad Nacional del Ambiente de Panamá (ANAM); Rigoberto Cuellar, Secretario de Estado para la Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente de Honduras (SERNA); Herman Rosa, Ministro del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (MARN); y Roxana Sobenes, Ministra del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Guatemala (MARN).
Autoridades anteriores: Javier Arias, Ligia Castro, Teófilo De la Torre, Roberto Dobles, Luis Alberto Ferraté, Carlos Guerrero, Jorge Rodríguez, Tomás Vaquero y Gaspar Vega.

Ministros/as de Hacienda o Finanzas:

Iván Acosta, Ministro del Ministerio de Hacienda y Crédito Público de Nicaragua (MHCP); Edgar Ayales, Ministro del Ministerio de Hacienda de Costa Rica (MH); Carlos E. Cáceres, Ministro del Ministerio de Hacienda de El Salvador (MH); Santiago Castillo, Ministro del Ministerio de Finanzas de Belice (MOF); Pavel Centeno, Ministro de Ministerio de Finanzas Públicas de Guatemala (MINFIN); Frank De Lima, Ministro del Ministerio de Economía y Finanzas de Panamá (MEF) y Wilfredo Cerrato, Secretario de Estado para la Secretaría de Finanzas de Honduras (SEFIN). Autoridades anteriores: Edgar Alfredo Balsells, Dean O. Barrow, William Chong Wong, Alfredo Rolando del Cid, Juan Alberto Fuentes, Alberto José Guevara, Héctor Guillermo Guillén, Fernando Herrero, Jenny Phillips, Rebeca Patricia Santos, Alberto Vallarino y Guillermo Zúñiga.

COMITÉ TÉCNICO REGIONAL (CTR)

Delegados/as de los Ministerios de

Ambiente: Sonia Baires, MARN El Salvador; Ana Rita Chacón, MINAET Costa Rica; Luis Fiallos, MARENA Nicaragua; Manuel López, SERNA Honduras; Carlos Mansilla, MARN Guatemala; Javier Morales, ANAM Panamá y Safira Vásquez, MNREI Belice.

Delegados/as de los Ministerios de

Hacienda o Finanzas: Rogelio Alvarado, MEF Panamá; Rina Castellanos MHCP El Salvador; Juan Manuel de la Cruz MINFIN Guatemala; Manuel Deshon, MHCP Nicaragua y Lourdes González, SEFIN Honduras.

Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD-SICA): Nelson Trejo, Secretario Ejecutivo; Raúl Artiga, delegado en el CTR.

Consejo de Ministros de Hacienda o Finanzas de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (COSEFIN): Martín O. Portillo, Secretario Ejecutivo y delegado en el CTR.

Secretaría de Integración Económica Centroamérica (SIECA): Ernesto Torres, Secretario General; Oscar Morales, delegado en el CTR. Autoridad anterior: Yolanda Mayora de Gavidia.

Delegados/as anteriores del CTR:

Gherda Barreto, Guillermo Barquero, Juan Sebastián Blas, Cecilia Carranza, Edgar Chamorro, Cynthia Deville, Paul Flowers, Ramón Frutos, Aristides Hernández, Leonel Lee, Darysbeth Martínez, José Francisco Rodríguez, Roberto Rodríguez, Bernardo Torres.

Colaboradores del CTR: Luis Alejandro Alejos, William Alpizar, Roberto Araquistain, Jorge Cabrera; Beverly D. Castillo, Carlos Fuller, Carlos Gómez, René López, Leslie Marin, Roberto Motta, Carlos J. Pérez, José Francisco Rodríguez, Martha Ruiz, Bernardo Torres.

UNIDAD COORDINADORA (UC) EN LA SEDE SUBREGIONAL DE LA CEPAL EN MÉXICO (CEPAL México)

Hugo E. Beteta, Director; Julie Lennox, coordinadora de la iniciativa, punto focal para cambio climático y jefe de la Unidad de desarrollo agrícola (UDA) de la CEPAL México; Jaime Olivares y Allan Beltrán, consultores y asistentes de investigación; Almudena Fernández, asistente de programación de la iniciativa; Blanca Urrea, asistente de programa de la UDA; Nohemí Vázquez, asistente administrativo; Ramón Cota, editor; María Eugenia Urzúa, diagramadora. Se agradece el apoyo de los equipos de dirección y administración de la oficina.

La División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la CEPAL

proporcionó asesoría, particularmente Joseluis Samaniego, Director y Luis Miguel Galindo, Jefe de la Unidad de cambio climático.

UKAID/ GOBIERNO DEL REINO UNIDO

Julie Chappel, Embajador del Reino Unido en Guatemala, Honduras y El Salvador; Ian Hughes, Anterior Embajador del Reino Unido en Guatemala, Honduras y El Salvador; Tom Kennedy, anterior Embajador del Reino Unido para Costa Rica y Nicaragua; enlaces con el proyecto.

Josceline Wheatley y Su Lin Garbett-Shiels de UKAID.

Se agradece la asesoría de Lord Nicholas Stern, Chris Taylor y Dimitri Zenghelis del Equipo Stern.

DANIDA/ AGENCIA DE COOPERACIÓN PARA EL DESARROLLO DE DINAMARCA

Søren Vøhtz, Embajador; Thomas Nielsen, Asesor Regional y Bayardo Quintero, Oficial de Programas.

EQUIPO TÉCNICO Y SOCIOS DEL ESTUDIO DE HIDROELECTRICIDAD

Julie Lennox, coordinadora y Allan Beltrán, consultor de la UC; quienes prepararon la publicación; Hugo Ventura, jefe de la Unidad de Energía y Recursos Naturales de la CEPAL México; Fernando López, consultor principal quien preparó el estudio técnico; Pablo Imbach y Luis Molina, consultores.

Carlos Mansilla de MARN Guatemala, Juan Fernando Castro Martínez (Gerente General 2008-2011) y Jorge Stalling, Gerente, Empresa de Comercialización de Energía del Instituto Nacional de Electrificación (INDE) Guatemala; Eddy Hardie Sánchez Bennett, Director General y Víctor Manuel Pérez González, Jefe Depto. de Investigación y Servicios Hidrológicos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología y Meteorología (INSIVUMEH).

Sonia Baires, Directora, y Doris Calderón, Técnica, de la Dirección General de Cambio Climático y Asuntos Estratégicos; Daisy López, Directora del Observatorio Ambiental de MARN El Salvador; Nicolás Salume (Presidente 2005-2009) y Rodolfo Cáceres, Gerente de Producción de la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL) El Salvador; y Carmen Torres, Jefe del Departamento de Concesiones, Superintendencia de Energía y Telecomunicaciones de El Salvador.

Se agradece el apoyo del Consejo de Electrificación de América Central (CEAC); los Directores de energía y hidrocarburos de América Central y Jorge Vásquez, Coordinador de la Unidad energética del SICA quienes proporcionaron orientaciones y sugerencias sobre el estudio.

ÍNDICE

	Página
Resumen ejecutivo	11
Introducción	16
1. Recopilación de información.....	22
2. Procesamiento de datos	27
3. Simulación de caudales	41
4. Simulación de escenarios de cambio climático	45
5. Conclusiones	79
6. Recomendaciones	86
Bibliografía	89

ÍNDICE DE MAPAS

	Página
1. Ríos Lempa y Chixoy: Área de Estudio	21
2. Cuenca del Río Chixoy: Estaciones Meteorológicas.....	23
3. Cuenca del Río Chixoy: Estaciones Hidrométricas	23
4. Cuenca del Río Lempa: Localización de Estaciones Meteorológicas.....	25
5. Cuenca del Río Lempa: Estaciones Hidrométricas.....	26

ÍNDICE DE GRÁFICOS

1. Cuenca del Río Chixoy: Relación Precipitación-Altitud, 1979-2008	27
2. Cuenca del Río Chixoy: Relación Temperatura-Altitud, 1979 –2008.....	29
3. Cuenca del Río Chixoy: Hidrogramas, 1970-2009	30
4. Embalse Chixoy: Relación entre temperatura y evaporación, 1970–2009	31
5. Hidroeléctrica Chixoy: Relación diaria caudal Turbinado-Energía, 2006 y 2007.....	32
6. Hidroeléctrica Chixoy: Relación mensual caudal Turbinado-Energía, 2006 y 2007	32
7. Cuenca del Río Lempa: Relación Precipitación-Altitud, 1971–2008	34
8. Cuenca del Río Lempa: Relación Temperatura-Altitud, 1971–2008	35
9. Cuenca del Río Lempa: Hidrogramas, 1984–2009	37
10. Cuenca del Río Lempa: Relación entre la Altitud y la Evaporación, 1984–2009.....	38
11. Hidroeléctrica Cerrón Grande: Relación mensual caudal Turbinado-Energía, 2000-2009.....	39
12. Cuenca del Río Chixoy: Relación entre Precipitación y Altitud, 1979–2008.....	42
13. Cuenca del Río Lempa: Relación entre la Precipitación y la Altitud, 1971–2008	44
14. Guatemala: Estación INSIVUMEH, Temperatura Media, 1920-2010	46
15. El Salvador: Estación Aeropuerto Ilopango, Temperatura Media, 1950-2010.....	46
16. Guatemala: Estación INSIVUMEH, Precipitación Acumulada, 1920-2010.....	47
17. El Salvador: Estación Ilopango, Precipitación Acumulada, 1960-2010.....	47
18. Guatemala: Estación INSIVUMEH, número de días de lluvia, 1920-2010.....	48
19. El Salvador: Estación Ilopango, número de días de lluvia, 1960-2010.....	48
20. Guatemala: Estación INSIVUMEH, cambio de Temperatura Media, escenarios B2 y A2, 1920-2100	49
21. Guatemala: Estación INSIVUMEH, cambio de Precipitación Acumulada, escenarios B2 y A2, 1920-2100	50

22.	El Salvador: Estación Ilopango, cambio de Temperatura Media, escenarios B2 y A2, 1940-2100	50
23.	El Salvador: Estación Ilopango, cambio de Precipitación Acumulada, escenarios B2 y A2, 1960-2100	51
24.	Embalse de Chixoy: Curva Área-Elevación	56
25.	Embalse de Chixoy: Curva Volumen-Elevación.....	57
26.	Embalse Cerrón Grande: Curva Área-Elevación.....	69
27.	Embalse Cerrón Grande: Curva Volumen-Altitud.....	70

ÍNDICE DE CUADROS

1.	Cuenca del Río Chixoy: Estaciones Meteorológicas.....	22
2.	Cuenca del Río Chixoy: Estaciones Hidrométricas	23
3.	Cuenca del Río Lempa: Estaciones Meteorológicas	24
4.	Cuenca del Río Lempa: Estaciones Hidrométricas.....	25
5.	Cuenca del Río Chixoy: Relación Precipitación-Altitud, 1979-2008.....	28
6.	Cuenca del Río Chixoy: Relación Temperatura-Altitud, 1979-2008.....	28
7.	Cuenca del Río Chixoy: Caudales Mensuales, 1970-2009.....	29
8.	Cuenca del Río Chixoy: Caudales Mensuales Específicos, 1970-2009.....	30
9.	Planta Chixoy: Energía y Caudal Turbinado Mensual, 2006 y 2007	33
10.	Cuenca del Río Lempa: Relación Precipitación-Altitud, 1971-2008.....	34
11.	Cuenca del Río Lempa: Relación Temperatura-Altitud, 1971-2008.....	35
12.	Cuenca del Río Lempa: Caudales Mensuales, 1984-2009.....	36
13.	Cuenca del Río Lempa: Caudales Mensuales Específicos, 1984-2009	36
14.	Cuenca del Río Lempa: Relación Evaporación-Altitud, 1984-2009	38
15.	Planta Cerrón Grande: Caudal Turbinado Mensual, 2000-2009	39
16.	Planta Cerrón Grande. Energía Mensual, 2000-2009.....	40
17.	Cuenca del Río Chixoy: Diferencias entre Estimaciones y Mediciones de Caudal, 1979-2008.....	43
18.	Cuenca del Río Lempa: Diferencias entre Estimaciones y Mediciones de Caudal, 1971-2008	44
19.	Río Chixoy: Cambios de Precipitación Acumulada en los departamentos de la cuenca, escenarios B2 y A2, 2020 a 2100.....	52
20.	Río Chixoy: Cambio de Temperatura Media en los departamentos de la cuenca, escenarios B2 y A2, 2020 a 2100	52
21.	Cuenca del Río Chixoy: Modelo de Precipitación número 1, escenario B2, 2020 a 2100	53

22.	Cuenca del Río Chixoy: Modelo Precipitación número 2, escenario B2, 2020 a 2100	53
23.	Cuenca del Río Chixoy: Modelo de Precipitación número 1, escenario A2, 2020 a 2100	54
24.	Cuenca del Río Chixoy: Modelo de Precipitación número 2, escenario A2, 2020 a 2100	54
25.	Cuenca del Río Chixoy: Modelo de Temperatura, escenarios B2 y A2, 2020 a 2100	55
26.	Cuenca del Río Chixoy: Resultados de Simulaciones de escenarios B2 y A2, 2020 a 2100	55
27.	Embalse del Chixoy: Pérdidas por Evaporación, escenarios B2 y A2, 2020 a 2100	57
28.	Planta Chixoy: Generación de Energía, 1979–2008.....	58
29.	Planta Chixoy: Generación de Energía, escenario B2, 2020.....	58
30.	Planta Chixoy: Generación de Energía, escenario B2, 2030.....	59
31.	Planta Chixoy: Generación de Energía, escenario B2, 2050.....	59
32.	Planta Chixoy: Generación de Energía, escenario B2, 2070.....	60
33.	Planta Chixoy: Generación de Energía, escenario B2, 2100.....	60
34.	Planta Chixoy: Generación de Energía, escenario A2, 2020	61
35.	Planta Chixoy: Generación de Energía, escenario A2, 2030	61
36.	Planta Chixoy: Generación de Energía, escenario A2, 2050	62
37.	Planta Chixoy: Generación de Energía, escenario A2, 2070	62
38.	Planta Chixoy: Generación de Energía, escenario A2, 2100	63
39.	Planta Chixoy: Generación de Energía, escenarios B2 y A2, 2020 a 2100	64
40.	Río Lempa: Cambios de Precipitación Acumulada para departamentos de la cuenca, escenarios B2 y A2, 2020 a 2100	65
41.	Río Lempa: Cambio de Temperatura Media para departamentos de la cuenca, escenarios B2 y A2, 2020 a 2100	65
42.	Cuenca del Río Lempa: Modelo de Precipitación número 1, escenario B2, 2020 a 2100	66
43.	Cuenca del Río Lempa: Modelo de Precipitación número 2, escenario B2, 2020 a 2100	66
44.	Cuenca del Río Lempa: Modelo de Precipitación número 3, escenario B2, 2020 a 2100	66
45.	Cuenca del Río Lempa: Modelo de Precipitación número 1, escenario A2, 2020 a 2100	67

46.	Cuenca del Río Lempa: Modelo de Precipitación número 2, escenario A2, 2020 a 2100	67
47.	Cuenca del Río Lempa: Modelo de Precipitación número 3, escenario A2, 2020 a 2100	67
48.	Cuenca del Río Lempa: Modelo de Temperatura, escenarios B2 y A2, 2020 a 2100	68
49.	Cuenca del Río Lempa: Resultados de Simulaciones de escenarios B2 y A2, 2020 a 2100	68
50.	Embalse Cerrón Grande: Pérdidas por Evaporación, escenarios B2 y A2, 2020 a 2100	70
51.	Planta Cerrón Grande: Generación de Energía, 1984–2009	72
52.	Planta Cerrón Grande: Generación de Energía, escenario B2, 2020	72
53.	Planta Cerrón Grande: Generación de Energía, escenario B2, 2030	73
54.	Planta Cerrón Grande: Generación de Energía, escenario B2, 2050	73
55.	Planta Cerrón Grande: Generación de Energía, escenario B2, 2070	74
56.	Planta Cerrón Grande: Generación de Energía, escenario B2, 2100	74
57.	Planta Cerrón Grande: Generación de Energía, escenario A2, 2020	75
58.	Planta Cerrón Grande: Generación de Energía, escenario A2, 2030	75
59.	Planta Cerrón Grande: Generación de Energía, escenario A2, 2050	76
60.	Planta Cerrón Grande: Generación de Energía, escenario A2, 2070	76
61.	Planta Cerrón Grande: Generación de Energía, escenario A2, 2100	77
62.	Planta Cerrón Grande: Generación de Energía, escenarios B2 y A2, 2020 a 2100	78
63.	Planta Chixoy: Resultados de Simulaciones, escenario B2, 2020 a 2100	80
64.	Planta Cerrón Grande: Resultados de Simulaciones, escenario B2, 2020 a 2100	80
65.	Planta Chixoy: Resultados de Simulaciones, escenario A2, 2020 a 2100	81
66.	Planta Cerrón Grande: Resultados de Simulaciones, escenario A2, 2020 a 2100.....	81

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

CAC	Consejo Agropecuario Centroamericano
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
CCA	Centro de Ciencias de la Atmósfera
CCAD	Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo
CEL	Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa de El Salvador
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
COMISCA	Consejo de Ministros de Salud de Centroamérica y República Dominicana
COP15	15ª Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Cambio Climático de las Naciones Unidas en Copenhague 2009
COP16	16ª Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Cambio Climático de las Naciones Unidas en Cancún 2010
COP 17	17ª Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Cambio Climático de las Naciones Unidas en Durban 2011
COSEFIN	Consejo de Ministros de Hacienda o Finanzas de Centroamérica, Panamá y República Dominicana
CTR	Comité Técnico Regional de la iniciativa ECCCA
DANIDA	Agencia de Cooperación para el Desarrollo de Dinamarca (por sus siglas en inglés)
ECCCA	La iniciativa “La economía del cambio climático en Centroamérica
ERCC	Estrategia Regional de Cambio Climático
INDE	Instituto Nacional de Electrificación de Guatemala
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático (por sus siglas en inglés)
MARN ES	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador
OMM	Organización Meteorológica Mundial
OPS	Organización Panamericana de la Salud
SICA	Sistema de Integración Centroamericana
SIECA	Sistema de Integración Económica Centroamericana
UKAID	Programa de Asistencia del Ministerio para el Desarrollo Internacional del Gobierno Británico (por sus siglas en inglés)
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
WAPPO	Programa de Simulación del Potencial de Recursos Hidroenergéticos (por sus siglas en inglés)

RESUMEN EJECUTIVO

Aunque se estima que Centroamérica seguirá produciendo una mínima parte de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del planeta, ya es una de las regiones más vulnerables a sus consecuencias negativas. Sus vulnerabilidades socioeconómicas históricas se exacerbaban por su ubicación geoclimática en un istmo estrecho que sirve de puente entre dos continentes, situado entre dos sistemas oceánicos, el Pacífico y el Atlántico. La región es gravemente afectada por sequías, ciclones y el fenómeno El Niño-Oscilación Sur (ENOS). El cambio climático está magnificando y ampliando estas vulnerabilidades sociales, económicas y ambientales e incidirá cada vez más en la evolución económica de la región, dado que los factores dependientes del clima son aportes significativos a las actividades económicas, como la agricultura y la generación hidroeléctrica.

En su cumbre de mayo de 2008, los Presidentes del Sistema de Integración Centroamericana (SICA) acordaron un conjunto de mandatos para sus instituciones nacionales y regionales sobre la respuesta al cambio climático y han ratificado y ampliado estos mandatos originales en sus cumbres de junio 2010, noviembre 2011 y junio 2012.

En este marco, los Ministros de Ambiente y Hacienda o Finanzas, con sus instancias regionales, la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD) y el Consejo de Ministros de Hacienda o Finanzas de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (COSEFIN), la Secretaría de Integración Económica de Centroamérica (SIECA), y la Comisión Económica para América latina y el Caribe (CEPAL), han emprendido la iniciativa “La economía del cambio climático en Centroamérica” (ECCCA), con financiamiento del Ministerio para el Desarrollo Internacional del Gobierno Británico (UKAID) y de la Agencia de Cooperación para el Desarrollo de Dinamarca (DANIDA).

En el marco de esta iniciativa, se realizó el presente estudio cuyo objetivo es estimar el efecto que tendrá el cambio climático sobre la generación de energía hidroeléctrica utilizando los escenarios climáticos desarrollados para la iniciativa. Se investigó la producción de energía en dos plantas hidroeléctricas seleccionadas por sus respectivas autoridades: Cerrón Grande en El Salvador, que utiliza las aguas del río Lempa, y Chixoy en Guatemala, que utiliza las aguas del río Chixoy. Este estudio es parte de una serie técnica con análisis preparados con la participación de diversos equipos de expertos coordinados por la CEPAL y revisados y aprobados por el Comité Técnico Regional (CTR) de la ECCCA, en consulta con expertos de la región.

La información disponible para la simulación de ambas cuencas fue proporcionada por el Instituto Nacional de Electrificación de Guatemala (INDE) y la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL). La simulación de caudales se realizó mediante una estimación de caudales, considerando el balance hídrico de cada cuenca. El programa utilizado, *Water and Power Potential* (WAPPO, por sus siglas en inglés), se basa en funciones de los principales parámetros del ciclo hidrológico e integra información meteorológica, geomorfológica e hidrológica. El balance de aguas muestra la interacción entre los parámetros determinantes del ciclo hidrológico y sus variaciones. De

acuerdo con los resultados, la precipitación es la variable determinante en el efecto del cambio climático sobre la disponibilidad de agua. La temperatura aumenta la evapotranspiración de la cuenca, pero tienden a producir cambios menores en el balance hídrico.

Los dos escenarios de emisiones de GEI utilizados son del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). El escenario más pesimista (llamado A2) proyecta un aumento continuo de las emisiones globales de GEI, resultando en un mayor incremento de la temperatura y una disminución sustancial de la lluvia en la mayor parte de Centroamérica, salvo en regiones de Costa Rica y Panamá. Los supuestos básicos de este escenario son una población mundial creciente, donde los patrones de fertilidad humana de las regiones convergen lentamente, el desarrollo económico se enfoca a nivel regional, y el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico evolucionan en forma lenta y fragmentada. Este escenario advierte altos riesgos para la región si la comunidad internacional no reduce la trayectoria actual de emisiones de GEI a nivel global.

El escenario menos pesimista (llamado B2) prevé una disminución menor de la lluvia en la mayor parte de la región y un incremento menor de la temperatura, suponiendo una trayectoria de emisiones de GEI menor que la del escenario A2. Sus supuestos básicos son un modelo de desarrollo orientado a soluciones económicas, sociales y ambientales locales, un crecimiento de la población mundial menor que en A2 y un desarrollo económico moderado. La materialización de este escenario probablemente requerirá un acuerdo y acciones internacionales para reducir substancialmente las emisiones globales de GEI a corto plazo.

Para efectos de este estudio sobre la generación hidroeléctrica, se realizaron los cálculos con el promedio de los resultados de tres modelos de circulación general para cada escenario del IPCC: HADCM3, GFDL R30 y ECHAM4 para B2 y HADGEM1, GFDL CM2.0 y ECHAM4 para A2. El cálculo de los cambios de temperatura y precipitación fueron estimados para 2020, 2030, 2050, 2070 y 2100 promediando los valores de estas anomalías para los departamentos que son parte de las cuencas. Por tratarse de escenarios a largo plazo que integran diversas “capas” de análisis con incertidumbres y dificultades metodológicas, los resultados deben interpretarse como tendencias y magnitudes relativas, no como predicciones ni como cifras exactas.

En el escenario A2, en la cuenca del río Chixoy de Guatemala se estima un incremento gradual de la temperatura durante el período 2020 a 2100 de 4,9 °C y una disminución gradual de la precipitación de aproximadamente 30%, con respecto al promedio del período 1961 a 1990. Esta disminución se observaría de forma más acelerada durante la segunda mitad del siglo. Como resultado se estima un incremento del 20% en la cantidad de lluvia que se pierde por la evapotranspiración, incluyendo la evaporación directa y la transpiración de la vegetación. Con escenario B2 el incremento de la temperatura sería de manera gradual a lo largo del período hasta un valor aproximado de 3,0 °C al corte 2100. Durante la primera parte del período de estudio la precipitación sería mayor al promedio histórico en un 4,6% y 4,0% (cortes 2020 y 2030), este incremento sería cada vez menor y para 2100 se estima un valor de precipitación 0,1% inferior al promedio histórico. Con B2 se estima un incremento de 7% en la fracción de precipitación que se pierde por evapotranspiración.

Para la cuenca del río Lempa con A2 se estima un incremento de temperatura de 4,8 °C a 2100. Del mismo modo, la precipitación disminuiría de forma gradual y en 2100 se estima 30% menor que la observada durante el promedio histórico 1961 a 1990, una tercera parte de esta disminución se daría durante el período 2070 a 2100. Como resultado se estima un incremento del 14% en la

proporción de lluvia que se pierde por evapotranspiración. Con B2 el incremento de temperatura sería de 3,0 °C y la precipitación sería aproximadamente 4% mayor a su valor histórico, hasta 2070. Para el corte 2100 se estima un valor de precipitación 2% menor que su valor histórico. Con este escenario se estima un incremento de 3% en la fracción de precipitación que se pierde por evapotranspiración.

La mayor parte de este incremento de la relación entre la evapotranspiración y la precipitación se debe a la disminución de la lluvia, lo que resulta en mayor pérdida de agua por evaporación, transpiración, infiltración, etc. Una conclusión es que la precipitación es el parámetro que determina en mayor medida la disponibilidad de agua en ambas cuencas.

De acuerdo con las simulaciones de las cuencas con los escenarios de cambio climático, los caudales de la presa de Chixoy se reducirían gradualmente hasta en un 83% en el corte 2100 con el escenario más pesimista (A2). En la presa de Cerrón Grande los caudales se reducen a largo plazo hasta en 70%, con notable variación inter-anual. En el escenario B2, los efectos en Chixoy se relacionarían más con el aumento de la temperatura que con la disminución de la precipitación. En 2100 los niveles de precipitación cambiarían poco frente al período histórico de referencia. Pero un aumento de temperatura de 3 °C se traduciría en una reducción del 28% del caudal para ese año. En el caso de Cerrón Grande, una reducción de 2% de la precipitación y un aumento de temperatura de 3 °C podrían reducir el caudal en 15%.

De acuerdo con los escenarios de cambio climático, las pérdidas de los embalses por evaporación aumentarían a lo largo del siglo, fenómeno principalmente relacionado con la alza progresiva de la temperatura. En el embalse de Chixoy, bajo el escenario más pesimista (A2), la evaporación incrementaría progresivamente hasta en 41% (de 0,33 m³/s a 0,47 m³/s) para el corte 2070 pero para el corte 2100 disminuiría a un valor de 0,40 m³/s debido al menor ingreso de agua al embalse. Con B2 se observaría un incremento progresivo de la evaporación, especialmente a partir de 2050, hasta un valor máximo de 0,47 m³/s en 2100. En Cerrón Grande las pérdidas por evaporación ya son mucho mayores que en Chixoy y aumentarían progresivamente a lo largo del período, especialmente a partir de 2050. Con A2 se espera que alcance un valor máximo de 4,97 m³/s a 2100, es decir un incremento del 22% con respecto a su valor histórico. En el escenario menos pesimista (B2) la pérdida sería menor, alcanzando hasta 8% con un valor máximo de 4,39 m³/s en 2100. En términos absolutos, las pérdidas adicionales por evaporación serían mayores en el embalse de Cerrón Grande, de 0,9 m³/s con A2 y 0,32 m³/s con B2, en comparación con los 0,14 m³/s en Chixoy con ambos escenarios.

Las estimaciones de generación de energía varían según el escenario considerado y los años de corte 2020, 2030, 2050, 2070, y 2100. En el escenario más pesimista (A2) se estiman reducciones superiores al 20% en ambas plantas para el corte 2020 respecto a la generación promedio de los períodos de referencia (1979 a 2008 para la planta de la cuenca del Chixoy y 1984 a 2009 para la cuenca del Lempa). A partir del corte 2050, las reducciones serían superiores al 40% en ambas hidroeléctricas. Para la hidroeléctrica del Chixoy, en el escenario A2, se esperan reducciones aproximadas de 25% en 2020, 37% en 2030, 47% en 2050, 70% en 2070 y 83% en 2100. Para la hidroeléctrica del Lempa, en el mismo escenario, se esperan reducciones de 22% en 2020, 34% en 2030, 41% en 2050, 57% en 2070 y 71% en 2100. En el escenario menos pesimista (B2), en cambio, se espera un incremento de entre 4% y 6% en ambas plantas para el corte 2020 respecto al período histórico de referencia. A partir de esta fecha, los estimados se vuelven negativos hasta llegar a una disminución de 26% en Chixoy y 17% en Lempa a 2100.

En resumen, el progresivo aumento de temperatura previsto, mayor en A2 que en B2, estará afectando la producción hidroeléctrica por la evapotranspiración en la cuenca y la evaporación en el embalse. Es importante observar que el alza de temperatura de la atmósfera podría contribuir a episodios de lluvias más intensas; y el aumento de la temperatura de la superficie del mar a mayor intensidad de huracanes. No obstante, el mayor riesgo se relaciona con la lluvia, cuyo patrón en la región ya demuestra gran variabilidad en su acumulado anual y en su distribución intraanual. Los escenarios futuros sugieren un posible aumento en la variabilidad de la lluvia acumulada anualmente con una reducción progresiva en el promedio anual especialmente en la segunda mitad del siglo. No obstante, el modelaje de la lluvia contiene varias incertidumbres aun por resolverse. Esta situación actual y futura, indica una cierta ventana de oportunidad a corto plazo, que se va a ir cerrando si no se aprovecha, para fortalecer la gestión de las cuencas, los embalses y las plantas existentes y el diseño de las nuevas iniciativas de gestión integral del recurso hídrico y adaptación a la variabilidad climática y los impactos del cambio climático. A continuación, se presenta un resumen de las recomendaciones emanadas de este estudio.

En la actualidad, la máxima generación de energía ocurre durante los meses en los que el caudal que ingresa a los embalses es mayor que el caudal turbinado. En ambos casos, los embalses tardan en llenarse aproximadamente cinco meses, de junio a octubre. Este patrón se modificaría en ambas hidroeléctricas en las condiciones de reducción general de la precipitación del escenario A2. En el escenario B2, el patrón se modificaría solo en la planta Cerrón Grande los últimos años del presente siglo. Esta estimación supone que las reglas de operación dan prioridad al llenado del embalse sobre la generación durante la época de lluvia. Así, las plantas generarían más energía durante el período de vaciado del embalse, entre noviembre y mayo, si bien el total generado en el año sería menor.

La generación de energía disminuiría gradualmente también por la disminución de la capacidad de almacenamiento de los embalses debido a su sedimentación. Este es un factor muy importante a considerar en los planes de generación futura. Se recomienda estudiarlo para calcular la pérdida de capacidad de generación, elaborar planes de sustitución de generación o de recuperación de los embalses, incluyendo recuperación de bosques en las cuencas y otras acciones de manejo integral de las mismas.

Para poder adaptarse a las condiciones cambiantes, es sumamente importante contar con la información necesaria para la toma de decisiones. Entonces se recomienda asegurar en el corto plazo la medición de la evaporación de la superficie libre de los embalses para calcular su balance. En el caso del embalse de Cerrón Grande se requerirá instalar una estación meteorológica e instrumentos para medir la evaporación de tanque. En ambos casos se recomienda mejorar la cobertura de las estaciones meteorológicas en las cuencas para alcanzar el mínimo recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM). En especial se recomienda instalar las estaciones meteorológicas en las partes altas de las cuencas. La inclusión del parámetro de evaporación en el cálculo del balance permitirá contar con la información para reducir este tipo de pérdidas en la operación de los embalses.

En este estudio el efecto del cambio climático ha sido evaluado a partir de los promedios móviles de cambios en la temperatura y la precipitación, en los que los años de corte corresponden a la información promedio de períodos de diez años. En el corto plazo se recomienda realizar un análisis de la variabilidad climática anual histórica y estimada en los escenarios de precipitación

durante las próximas dos décadas para prever posibles cambios en variabilidad entre años más secos y más húmedos.

Para mejorar los resultados del balance de aguas, en el corto plazo se recomienda utilizar modelos que incluyan el uso del suelo y el incremento de la población, considerando sus efectos probables y los recursos para enfrentarlos. Igualmente, se recomienda analizar el efecto del incremento de temperatura sobre la generación de energía en períodos secos. Este efecto podría estarse presentando ya y merece atención para diseñar medidas de adaptación urgentes.

Los análisis operativos deberán considerar también la función de los proyectos de futuros embalses en la adaptación al cambio climático, tanto para la operación rutinaria del embalse y la planta como medidas de emergencia frente a exceso o ausencia de caudal, con consideraciones no solamente de cada planta sino sobre el manejo de cada cuenca. Tales son los casos del proyecto El Tigre (binacional con Honduras) en el río Lempa, los proyectos aguas arriba (Serchil) del río Chixoy y los posibles proyectos aguas abajo. Los planes para esta última cuenca deberán considerar otras implicaciones, ya que ésta es afluente del Usumacinta (binacional con México). El Usumacinta-Grijalva carece de infraestructura de embalses y desemboca en Villa Hermosa, Tabasco, México, ciudad muy afectada por las inundaciones y amenazada por el posible aumento del nivel del mar.

Se recomienda mejorar la eficiencia de todos los sistemas que utilizan agua ante la menor disponibilidad eventual del recurso y adoptar un manejo adecuado de las cuencas para evitar la erosión de los suelos y la sedimentación de los embalses, así como la regulación del ciclo hidrológico. Para esto se requieren proyectos de reforestación y conservación de bosques y prácticas adecuadas de uso del suelo y el agua de riego.

Respecto a los caudales disponibles, se recomienda optimizar la operación de los sistemas de aprovechamiento de agua, incluyendo los de las plantas hidroeléctricas. De la misma manera se considera recomendable implementar sistemas de almacenamiento estacional para compensar el efecto de la reducción de caudales en el período de estiaje.

Finalmente, para mejorar los niveles de generación de energía en ambas cuencas se recomienda revisar en el corto plazo los modelos de operación de los embalses de las plantas para optimizar la generación de energía ante los escenarios tendenciales de reducción de caudales y ante probables aumentos en la variabilidad de las mismas aun a corto plazo.

Se recomienda aplicar este análisis a otras hidroeléctricas de la región, particularmente las consideradas estratégicas. Será importante estudiar el efecto de los escenarios de cambio climático en la generación de energía de plantas que operan a filo de agua o con embalses de regulación diaria, en especial el efecto en la generación durante el estiaje.

INTRODUCCIÓN

Aunque se estima que Centroamérica seguirá produciendo una mínima parte de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del planeta, ya es una de las regiones más vulnerables a sus consecuencias negativas. Sus vulnerabilidades socioeconómicas históricas se exacerban por su ubicación geoclimática en un istmo estrecho que sirve de puente entre dos continentes, situado entre dos sistemas oceánicos, el Pacífico y el Atlántico. La región es gravemente afectada por sequías, ciclones y el fenómeno El Niño-Oscilación Sur. El cambio climático está magnificando y ampliando estas vulnerabilidades sociales, económicas y ambientales e incidirá cada vez más en la evolución económica de la región, dado que los factores dependientes del clima son aportes significativos a las actividades económicas, como la agricultura y la generación hidroeléctrica. En términos fiscales constituye un pasivo público contingente que afectará las finanzas públicas de forma creciente; y reconociendo que éstas ya cargan con los costos de un creciente número de eventos extremos como huracanes, lluvias intensas e inundaciones.

Por otro lado, la región contiene valiosos acervos que requieren ser preservados y valorados por su contribución al desarrollo de las generaciones actuales y futuras, como sus ecosistemas y su biodiversidad abundante, que son proveedores de múltiples servicios. Estos ecosistemas se deterioran actualmente por el patrón de desarrollo insostenible y serán más afectados aún por el cambio climático. La población de la región, relativamente joven y con su diversidad cultural, étnica, lingüística y de estilos de vida, es un tesoro que requiere mayor reconocimiento e inversión para revalorar y desarrollar sus capacidades de respuesta.

En su cumbre de mayo de 2008, los Presidentes del Sistema de Integración Centroamericana (SICA) acordaron un conjunto de mandatos para sus instituciones nacionales y regionales sobre la respuesta al cambio climático. Desde esta cumbre, la preocupación sobre los impactos de este fenómeno, lo ha mantenido en la agenda regional, y los Presidentes han ratificado y ampliado sus mandatos originales en sus cumbres de junio 2010, noviembre 2011 y junio 2012.

En este marco, los Ministros de Ambiente y Hacienda o Finanzas, con sus instancias regionales, la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD) y el Consejo de Ministros de Hacienda o Finanzas de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (COSEFIN), la Secretaría de Integración Económica de Centroamérica (SIECA), y la Comisión Económica para América latina y el Caribe (CEPAL), han emprendido la iniciativa “La economía del cambio climático en Centroamérica”. Dicha iniciativa busca generar evidencia sobre la vulnerabilidad de la región al cambio climático, estimar potenciales impactos y costos en diferentes sectores, alertar a los tomadores de decisiones y actores clave de la región sobre la urgencia de enfrentar el reto del cambio climático y propiciar un diálogo sobre opciones de políticas y acciones nacionales y regionales. La iniciativa ha contado con financiamiento del Programa de asistencia del Ministerio para el Desarrollo Internacional del gobierno británico (UKAID) y de la Agencia de Cooperación para el Desarrollo de Dinamarca (DANIDA).

La iniciativa cuenta con un mecanismo de gestión conjunta con los Ministerios de Ambiente y Hacienda o Finanzas, que incluye las instancias ministeriales y un Comité Técnico Regional (CTR) con delegados de dichos ministerios, CCAD, COSEFIN y SIECA, que realizan la gestión técnica del proyecto con la Sede Subregional de la CEPAL en México. Recientemente, se han realizado consultas y establecido acuerdos con los Consejos de Ministros de Agricultura y Salud (CAC y COMISCA) y sus Secretarías Ejecutivas, con respecto a la agenda de cambio climático en estos dos sectores claves.

El análisis realizado considera el impacto potencial del cambio climático en Centroamérica en diversos escenarios de desarrollo y trayectorias de emisiones, frente a los costos y beneficios de posibles respuestas de inacción (conocidas como *business as usual*), opciones de reducción de vulnerabilidad, adaptación y transición hacia una economía sostenible y baja en carbono. Establece un escenario macroeconómico tendencial sin cambio climático contra el cual se mide el costo del fenómeno. Se utiliza un análisis de impactos “de abajo hacia arriba”, analizando sectores y ámbitos como agricultura, recursos hídricos, eventos extremos y servicios ecosistémicos para hacer una valorización económica en función del PIB. Se exploran ampliamente los retos y opciones de adaptación y desarrollo de economías bajas en carbono en diversos sectores. Los escenarios futuros fueron estimados al corte 2100, con cortes en los años 2020, 2030, 2050 y 2070 para estimar impactos y costos. Para las opciones de mitigación se adopta un marco temporal hacia el corte 2030 por la incertidumbre sobre cambios tecnológicos, con cortes a los cortes 2010 y 2020. Por tratarse de escenarios futuros a largo plazo que integran diversas “capas” de análisis con sus respectivas incertidumbres y dificultades metodológicas, los resultados deben interpretarse como tendencias y magnitudes relativas, no como cifras exactas.

Los resultados de los primeros años de trabajo, sugieren que los impactos del cambio climático en Centroamérica en un escenario de emisiones crecientes e inacción global tipo A2 son significativos y crecientes, con cierto grado de heterogeneidad por países. Se confirmaría la asimetría de que los países desarrollados que más han contaminado sufren menos impactos y tienen los recursos para adaptarse. En cambio, los países que menos han contribuido al problema sufren mayores impactos y tienen menos resiliencia. Se confirma también el planteamiento de que los costos de los impactos en un escenario de inacción global, particularmente de los países emisores grandes, serían más elevados que los de un escenario con un acuerdo internacional equitativo e incluyente que lograra reducir significativamente las emisiones. Tendría que ser un acuerdo con responsabilidades compartidas pero diferenciadas entre los países, que facilite a los países altamente vulnerables, como los de Centroamérica, a avanzar con medidas de adaptación y mitigación en un marco de desarrollo sostenible e incluyente.

Desde la óptica económica es más rentable actuar ahora que dejar el problema a las generaciones futuras, además de las consideraciones éticas de esta posición. Los resultados demuestran que el valor presente del costo de los impactos del cambio climático resultará demasiado alto a la postre si no tomamos medidas ambiciosas e inmediatas. Los resultados confirman que el cambio climático es el mayor fracaso del mercado jamás visto por no internalizar el valor del clima como bien público global y no registrar adecuadamente los impactos sociales y en los servicios ambientales. Esto implica que, más allá de la valorización económica, se requiere tomar decisiones éticas respecto a las inequidades intrageneracionales adicionales y a como valorizar las necesidades de futuras generaciones y de los ecosistemas, que nos prestan múltiples servicios ambientales, los cuales perderemos antes de que el mercado nos dé señales que pudieran incentivar su adecuado manejo. También implica que el cambio climático no puede ser tratado como responsabilidad

exclusiva de las instituciones ambientales, sino como problema económico central y transversal con serias implicaciones fiscales.

El reto de adaptación para Centroamérica es altamente preocupante porque exige redoblar esfuerzos para reducir la pobreza, la desigualdad y la vulnerabilidad socioeconómica y ambiental, y aumentar la resiliencia y la capacidad adaptativa de las sociedades, poblaciones específicas y ecosistemas conexos. Debe admitirse asimismo que habrá límites a la adaptación, con pérdidas y daños no reparables aun si hubiera financiamiento abundante, especialmente en el escenario de inacción con una economía mundial alta en carbono.

Las sociedades centroamericanas necesitan evitar estrategias *ad hoc* de lógica inercial que podrían resolver urgencias pero profundizarían los riesgos. En esta lógica el cambio climático puede considerarse importante pero no atendible a fondo dadas las restricciones presupuestarias profundizadas por la actual recesión global y las presiones de las urgencias sociales y económicas que podrían enfrentarse convencionalmente. En las negociaciones internacionales hay una tendencia a separar las medidas de adaptación de las de mitigación. Esta solución puede ser impráctica para países con recursos fiscales y de inversión limitados.

Más recomendable sería lograr acuerdos nacionales, regionales e internacionales para impulsar estrategias adaptativas incluyentes y sustentables que integren las acciones de reducción de vulnerabilidades, incluyendo la reducción de pobreza, con las de adaptación y las medidas de transición a economías más sostenibles y bajas en carbono. Esto incluye acciones de interés para la agenda de desarrollo sostenible e incluyente que pueden generar cobeneficios de reducción de emisiones, como puede ser la protección o restauración de bosques, eficiencia energética e hídrica. En este escenario la actual recesión económica global y los riesgos de cambio climático serían convertidos en oportunidad para revisar a profundidad la especialización productiva de las economías. Esto incluiría sus formas de inserción en los mercados regional y global, los vínculos entre sus patrones energéticos y las externalidades negativas por emisiones contaminantes y GEI, pérdidas de salud pública y de cosechas, debilidades de la infraestructura rural y urbana, degradación de ecosistemas y pérdida de sus servicios que se traducen en costos sociales y ambientales crecientes.

Las sociedades centroamericanas necesitan volverse audaces gestoras del recurso hídrico, asegurando su uso sostenible y eficiente para beneficio de la población y la producción. Blindar la seguridad alimentaria ante el cambio climático, particularmente de granos básicos, y transitar hacia una agricultura más sostenible es un gran reto, pero necesario para proteger a la población pobre, tanto pequeños productores como consumidores urbanos. La protección de los ecosistemas naturales y su biodiversidad, incluyendo bosques, sistemas montañosos y fluviales, zonas costero-marinas, incluyendo corales y manglares, es vital para mantener los múltiples servicios que éstos proporcionan a la población humana y otros seres vivos. Un elemento esencial de adaptación al cambio climático y la transición a economías bajas en carbono es el cambio tecnológico, entendido como acceso a tecnologías modernas y rescate de conocimientos y tecnologías tradicionales y locales, particularmente de los pueblos indígenas y comunidades campesinas. La región ha desarrollado una seria dependencia de fuentes energéticas importadas y de origen fósil altamente contaminantes. El tránsito a una matriz energética basada en fuentes renovables locales mejoraría la seguridad energética, ahorraría divisas y reduciría los impactos negativos de los combustibles fósiles en la salud humana y las emisiones GEI y necesita ser diseñado para minimizar impactos ambientales negativos y beneficiar a la población que vive en pobreza. Es importante observar que las ventajas y

desventajas de diversas opciones de política pueden variar entre países y dependen de acuerdos internacionales aún por establecerse. Por este contexto variable e incierto, la iniciativa busca proporcionar un análisis diverso, no necesariamente vinculado a la posición de algún país en particular.

Con el propósito de divulgar y discutir los resultados de esta iniciativa y aprovechar los resultados en la formulación de políticas nacionales y estrategias regionales, se publicaron los documentos Síntesis 2010 y Reporte técnico 2011, y se ha presentado los resultados en aproximadamente veinte eventos nacionales y regionales con la participación de aproximadamente 800 funcionarios públicos, representantes de organizaciones no gubernamentales, de gremios y el sector privado, universidades y otros centros de investigación. Igualmente, en coordinación con los Ministros de Ambiente, los resultados han sido presentados en las últimas tres Conferencias de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP's 15, 16 y 17), en eventos “paralelos” organizados por los Ministros de Ambiente, la CEPAL y otras agencias internacionales. Los resultados han servido de insumo para capacitaciones con los comités nacionales de cambio climático y equipos de negociadores. Sus diversos análisis técnicos fueron incluidos en la Estrategia Regional de Cambio Climático, aprobada por los Ministros de Ambiente en 2010, y fueron utilizados para la preparación de proyectos de financiamiento internacional y para la discusión de diversas políticas nacionales.

En función de estos avances, los socios de la iniciativa acordaron avanzar en la generación de evidencia que apoya la preparación de políticas de adaptación incluyente y sostenible, tomando en cuenta las necesidades de los diferentes países y sectores; buscando preparar análisis desagregado a nivel sectorial, espacial y temporal, con énfasis en las tendencias climáticas de las últimas décadas y escenarios de las próximas décadas. Así, la iniciativa ha preparado análisis de las tendencias del clima en las últimas décadas, escenarios futuros a escala departamental y por patrones intraanuales; los cambios potenciales en indicadores de aridez con los escenarios climáticos; e impactos potenciales en la generación de hidroelectricidad con dos casos en Guatemala y El Salvador.

Con los Ministerios de Salud y su Consejo de Ministros de Salud de Centroamérica y República Dominicana (COMISCA), la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y varias instituciones expertas se ha acordado realizar una iniciativa “Evidencia de las enfermedades sensibles al clima”, para avanzar en el análisis sobre el impacto potencial del cambio climático en las enfermedades frecuentes en la región. Como primer paso, se ha preparado un análisis del estado actual de conocimiento sobre la relación clima con la incidencia de enfermedades, tales como la malaria, el dengue y las enfermedades respiratorias, entre otras.

La iniciativa ejecuta un componente con los Ministerios de Finanzas o Hacienda, lo cual incluye un análisis de tendencias históricas y sostenibilidad fiscal, dos cursos técnicos para funcionarios de los ministerios de finanzas y un foro técnico. Apoya a los Ministerios de Energía con una asesoría para una propuesta de una mayor integración de la respuesta al cambio climático en la Estrategia Regional Energética Sustentable Centroamericana 2020; prepara un análisis de variabilidad climática en base a las series históricas de estaciones representativas de la región para los Ministerios de Ambiente; y está estableciendo una agenda de trabajo técnico con los Ministerios de Agricultura y su Consejo Agropecuario Centroamericano (CAC).

Para apoyar la divulgación de los resultados de los nuevos análisis, se publica esta Serie técnica 2012, incluyendo esta publicación sobre los impactos potenciales en la generación de energía en dos cuencas específicas, la del río Lempa en El Salvador y la del río Chixoy en Guatemala. Estos

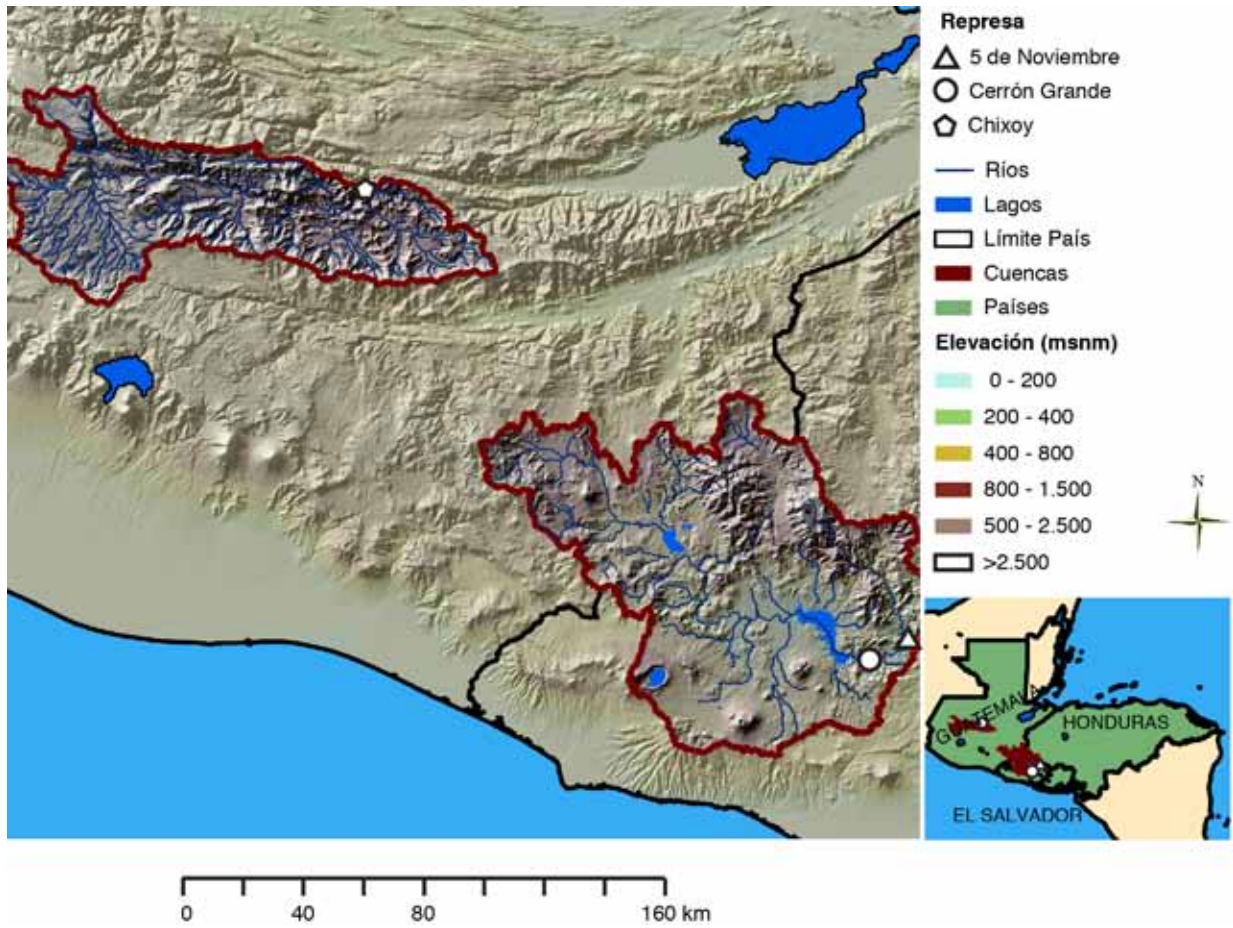
estudios fueron preparados con la participación de diversos equipos de expertos coordinados por la Unidad Coordinadora en la CEPAL (UC/CEPAL) y revisados y aprobados por el Comité Técnico Regional (CTR) de la ECCCA, en consulta con expertos del sector hidroeléctrico de la región, especialmente las instituciones del sector en El Salvador y Guatemala.

Para desarrollar este estudio se propuso investigar la producción de energía de dos plantas hidroeléctricas de importancia nacional: Cerrón Grande en El Salvador, que utiliza las aguas del río Lempa, y Chixoy en Guatemala, que utiliza las aguas del río Chixoy. El río Lempa drena hacia el Océano Pacífico, mientras el Chixoy drena hacia el Golfo de México, lo cual garantiza resultados en ambientes y climas diferentes.

Para ambas cuencas se cuenta con información cartográfica, meteorológica, hidrológica y de operación de las plantas, que permite estudiar las condiciones actuales de generación de energía. De acuerdo con los escenarios de la iniciativa “La economía del cambio climático en Centroamérica”, el objetivo del trabajo es estimar el efecto probable de dichos escenarios sobre la generación de energía. Por tratarse de escenarios a largo plazo que integran diversas “capas” de análisis con incertidumbres y dificultades metodológicas, los resultados deben interpretarse como tendencias y magnitudes relativas, no como predicciones ni como cifras exactas.

Es importante precisar que el estudio solo incluye la simulación hidrológica de las condiciones meteorológicas de los escenarios de cambio climático, asumiendo que las condiciones hidrológicas y de los embalses no cambien. No incluye, por ejemplo, la sedimentación de los embalses, que disminuye continuamente la capacidad de almacenamiento y eventualmente provocará que ambas plantas operen a filo de agua. La disminución de la capacidad de generación debida a la sedimentación de los embalses es un factor importante que requiere un estudio específico de los datos de transporte de sedimento y de la batimetría periódica. Otros factores, como el crecimiento de plantas perennes flotantes, como el Jacinto Acuático (*Eichornia crassipes*) en el embalse de Cerrón Grande, requieren de análisis específicos que no están incluidos en este trabajo. La localización del área de estudio se muestra en el mapa 1.

MAPA I
RÍO LEMPA Y CHIXOY: ÁREA DE ESTUDIO



Fuente: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).

I. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

INFORMACIÓN DISPONIBLE: CUENCA DEL RÍO CHIXOY

La información para la simulación de la cuenca del río Chixoy fue proporcionada por el Instituto Nacional de Electrificación de Guatemala (INDE). Ésta comprende datos de precipitación, temperatura y evaporación de tanque de las estaciones meteorológicas de la cuenca y sus cercanías, así como de los caudales de las estaciones hidrométricas instaladas en el río Chixoy y sus tributarios y en el sitio de la presa. Además se contó con información de la generación de energía mensual de la planta hidroeléctrica.

Los datos disponibles de las estaciones meteorológicas para las que se tiene información se muestran en el cuadro 1. En el mapa 2 se muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas. Los datos de las estaciones hidrométricas se incluyen en el cuadro 2 y su localización se muestra en el mapa 3.

CUADRO I
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: ESTACIONES METEOROLÓGICAS
(En metros sobre el nivel del mar)

Clave	Estación Meteorológica	Coordenadas Geográficas		Elevación (msnm)	Propiedad	Información
		Latitud Norte	Longitud Oeste			
141201	San Antonio Ilot.	15° 03' 17"	91° 13' 38"	1 942	INDE	P
210201	Xequemeya	15° 05' 47"	91° 21' 09"	2 140	INDE	P
210402	Tierra Blanca	15° 06' 38"	91° 29' 45"	2 325	INDE	P,T
071001	Serchil	15° 14' 00"	91° 24' 00"	2 140	INDE	P,T
141602	El Paradillo	15° 15' 47"	91° 19' 54"	1 450	INDE	P,T
141101	San Andrés Sajcab.	15° 10' 29"	90° 56' 32"	1 300	INDE	P,T
020204	El Cebollal	15° 12' 30"	90° 43' 50"	821	INDE	P,T
020604	San Jerónimo	15° 04' 40"	90° 15' 00"	1 000	INSIVUMEH	P
020602	Matanzas	15° 06' 18"	90° 11' 27"	1 510	INDE	P
010826	Pueblo Viejo	15° 16' 20"	90° 29' 45"	1 289	INDE	P,T,E
141506	Chicaman	15° 20' 45"	90° 48' 55"	1 500	INDE	P,T
141603	Comitancillo	15° 13' 32"	91° 14' 20"	1 760	INDE	P
140305	Chajul	15° 29' 00"	91° 02' 09"	1 980	INDE	P

Nota: P = Precipitación T = Temperatura E = Evaporación de Tanque

Fuente: Elaboración propia con información del INDE y del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH).

MAPA 2
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: ESTACIONES METEOROLÓGICAS



Fuente: Sistema de Información Geográfica del Ministerio de Energía y Minas de Guatemala.

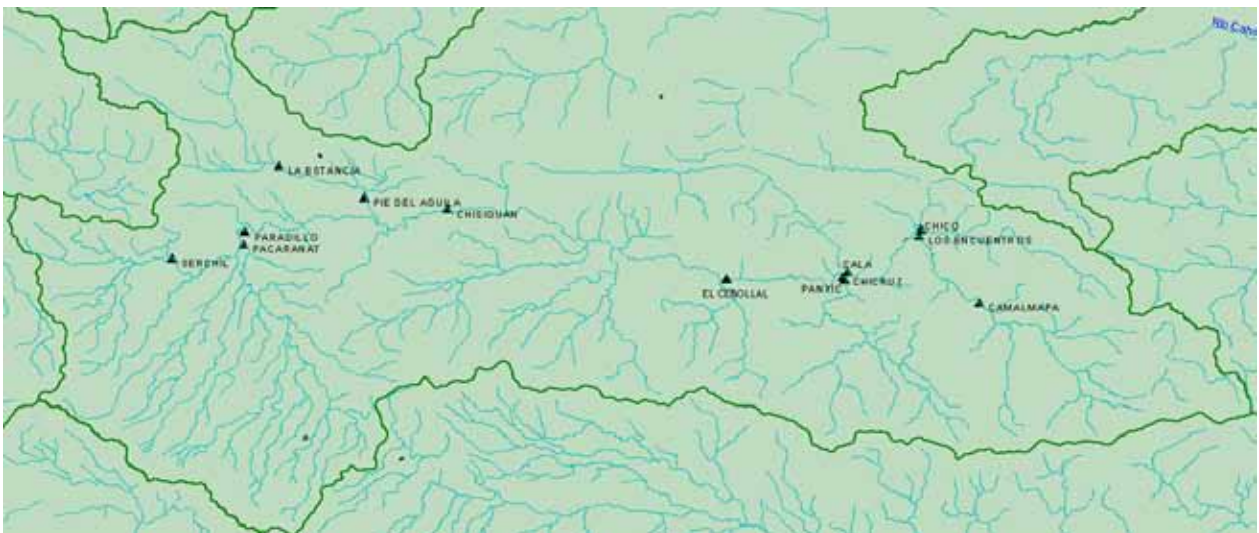
CUADRO 2
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: ESTACIONES HIDROMÉTRICAS

(En kilómetros cuadrados)

Código	Estación	Río	Área Cuenca (km ²)	Coordenadas Geográficas		Propiedad
				Latitud Norte	Longitud Oeste	
141601	El Paradillo	Chixoy	1 363	15° 16' 00"	91° 19' 00"	INDE
070201	La Estancia	San Juan	ND	15° 20' 45"	91° 16' 30"	INDE
140101	Chisiguan	Chixoy	2 245	15° 17' 40"	91° 04' 08"	INDE
020204	El Cebollal	Chixoy	3 501	15° 23' 39"	90° 43' 24"	INDE
020701	Camalmapa	Salama	621	15° 10' 47"	90° 25' 09"	INDE

Fuente: Elaboración propia con información del INDE.

MAPA 3
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: ESTACIONES HIDROMÉTRICAS



Fuente: Sistema de Información Geográfica del Ministerio de Energía y Minas de Guatemala.

INFORMACIÓN DISPONIBLE: CUENCA DEL RÍO LEMPA

La información disponible para la simulación de la cuenca del río Lempa hasta el sitio de la hidroeléctrica Cerrón Grande fue proporcionada por la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL) y comprende datos de precipitación, temperatura y evaporación de tanque de las estaciones meteorológicas localizadas en la cuenca y sus cercanías, así como información de caudales de las estaciones hidrométricas instaladas en el río Lempa y sus tributarios y en el sitio de la presa. Además se contó con información de la generación de energía mensual de la planta hidroeléctrica.

Los datos disponibles de las estaciones meteorológicas para las que se tiene información se muestran en el cuadro 3. En el mapa 4 se muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas. Los datos de las estaciones hidrométricas se incluyen en el cuadro 4 y su localización se muestra en el mapa 5.

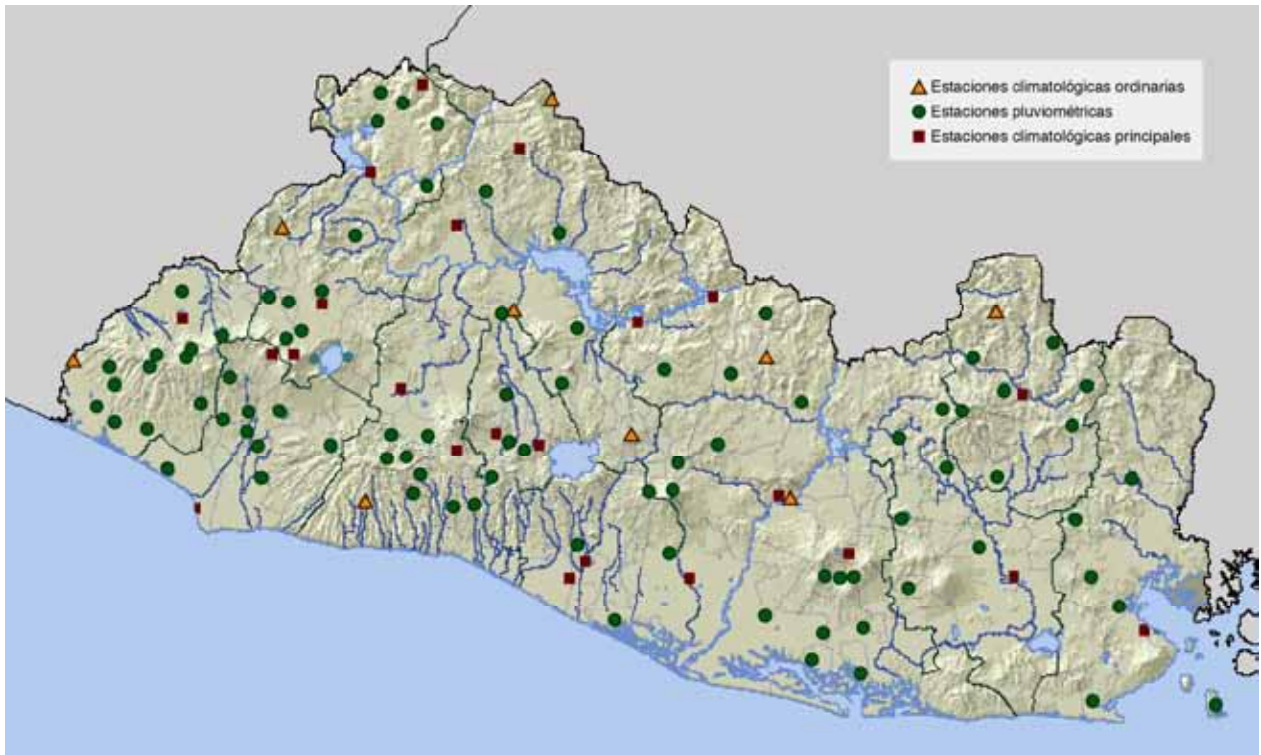
CUADRO 3
CUENCA DEL RÍO LEMPA: ESTACIONES METEOROLÓGICAS

(En metros sobre el nivel del mar)

País	Estación	Datos	Coordenadas Geográficas		Elevación (msnm)
			Latitud Norte	Longitud Oeste	
El Salvador	Santa Ana El Palmar	P,T	13° 58' 60"	89° 34' 20"	725
	Guija	P, T,E	14° 13' 70"	89° 28' 70"	485
	Candelaria de la Frontera	P	14° 07' 20"	89° 39' 10"	700
	Chorrera del Guayabo	P, T	13° 59' 80"	88° 45' 40"	190
	Sensuntepeque	P,T	13° 54' 00"	88° 38' 00"	750
	Cerrón Grande	P, T	13° 56' 30"	88° 47' 10"	600
	Cojutepeque SM	P,T	13° 43' 20"	88° 55' 60"	880
	Nueva Concepción	P, T	14° 07' 50"	89° 17' 40"	320
	La Palma	P, T	14° 17' 50"	89° 09' 70"	1 000
	Las Pilas	P, T	14° 21' 90"	89° 05' 40"	1 960
	San Andrés	P, T	13° 48' 50"	89° 24' 40"	460
	Aeropuerto de Ilopango	P, T	13° 41' 90"	89° 07' 10"	615
	Puente Cuscatlán	P, T	13° 36' 10"	88° 35' 60"	20
	San Francisco Gotera	P, T	13° 41' 80"	88° 06' 40"	250
	Perquín	P, T	13° 57' 50"	88° 09' 70"	1 225
Guatemala	La Ceibita	P	14° 29' 60"	89° 52' 50"	960
	Asunción Mita	P	14° 20' 10"	89° 42' 40"	478

Fuente: Elaboración propia con información del Observatorio Ambiental del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (MARN ES) y el INSIVUMEH.

MAPA 4
CUENCA DEL RÍO LEMPA: LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS



Fuente: Observatorio Ambiental del MARN ES.

CUADRO 4
CUENCA DEL RÍO LEMPA: ESTACIONES HIDROMÉTRICAS

(En metros sobre el nivel del mar y kilómetros cuadrados)

País	Estación	Coordenadas Geográficas		Elevación (msnm)	Área Cuenca (km ²)
		Latitud Norte	Longitud Oeste		
El Salvador	Tamarindo	14° 02' 45"	89° 15' 09"	261	4 785
	Paso del Oso	14° 05' 50"	89° 25' 00"	295	4 531
	Citala	14° 22' 10"	89° 12' 90"	702	914
	Zapotillo	14° 10' 70"	89° 24' 90"	329	3 246

Nota: msnm = metros sobre el nivel del mar.

Fuente: Elaboración propia con información del Observatorio Ambiental del MARN ES.

MAPA 5
CUENCA DEL RÍO LEMPA: ESTACIONES HIDROMÉTRICAS



Fuente: Observatorio Ambiental del MARN ES.

2. PROCESAMIENTO DE DATOS

El procesamiento de los datos consiste en la obtención de los resúmenes anuales de la información hidrometeorológica (precipitación, temperatura, evaporación y caudales).

CUENCA DEL RÍO CHIXOY

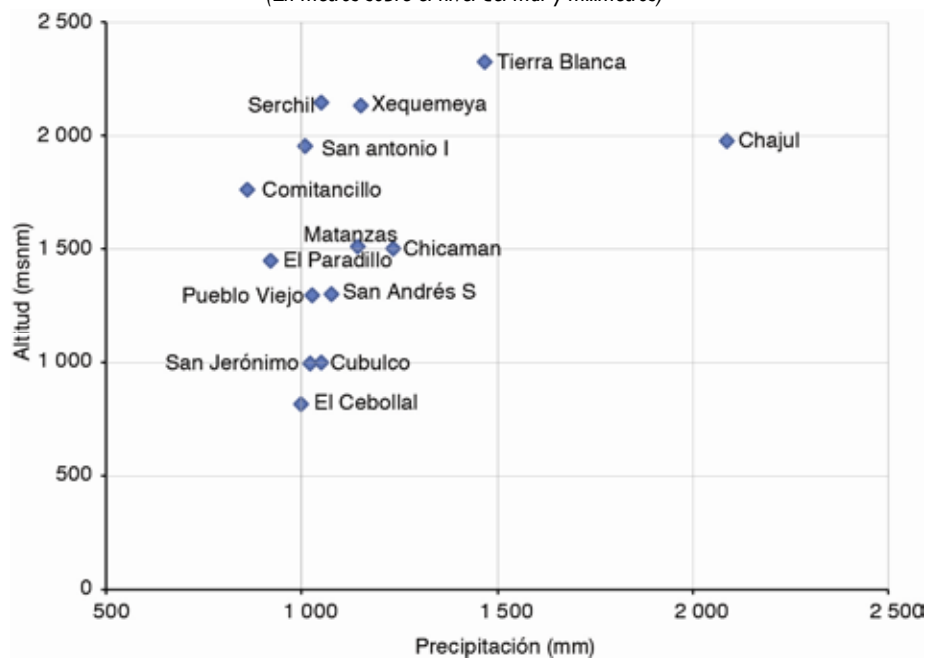
Los datos de precipitación se procesaron a nivel mensual y se obtuvieron los totales anuales para obtener promedios de una serie desde 1979 hasta 2008. Las series anuales de precipitación se completaron utilizando ecuaciones de regresión de las correlaciones entre las series.

Con las series de precipitación anual se elaboró el gráfico 1, que presenta la variación de la precipitación en relación con la altitud. Los datos de este gráfico se incluyen en el cuadro 5. Los modelos de precipitación cargados al modelo de simulación fueron elaborados a partir de los datos del gráfico 1, los cuales equivalen a los ingresos netos de agua a las subcuencas.

De acuerdo con el gráfico 1, la precipitación en la cuenca del Chixoy no varía en forma significativa con la altitud. Esto facilita la simulación debido a que sólo el área localizada al sur de la Sierra de los Cuchumatanes presenta precipitaciones que se incrementan sustancialmente con la altitud.

GRÁFICO 1
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ALTITUD, 1979-2008

(En metros sobre el nivel del mar y milímetros)



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 5
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ALTITUD, 1979-2008

(En metros sobre el nivel del mar y milímetros)

Estación	Altitud (msnm)	Precipitación (mm)
Tierra Blanca	2 325	1 464
Xequemeya	2 140	1 148
Serchil	2 140	1 050
San Antonio I	1 942	1 016
El Paradillo	1 450	920
Comitancillo	1 760	865
San Andrés S	1 300	1 084
Chicaman	1 500	1 229
El Cebollal	821	999
Cubulco	994	1 042
San Jerónimo	1 000	1 021
Matanzas	1 510	1 141
Chajul	1 980	2 085
Pueblo viejo	1 289	1 019

Fuente: Elaboración propia.

Los datos de temperatura se procesaron a nivel mensual y se obtuvieron los promedios anuales de la serie de datos disponible. La temperatura varía poco a lo largo del año, por lo que no se consideró necesario correlacionar las series para completarlas. Con las series de temperatura anual del cuadro 6 se elaboró el modelo de temperatura-elevación mostrado en el gráfico 2. Este modelo está bien definido, como se aprecia en el gráfico, y es utilizado para estimar las pérdidas por evapotranspiración en la cuenca.

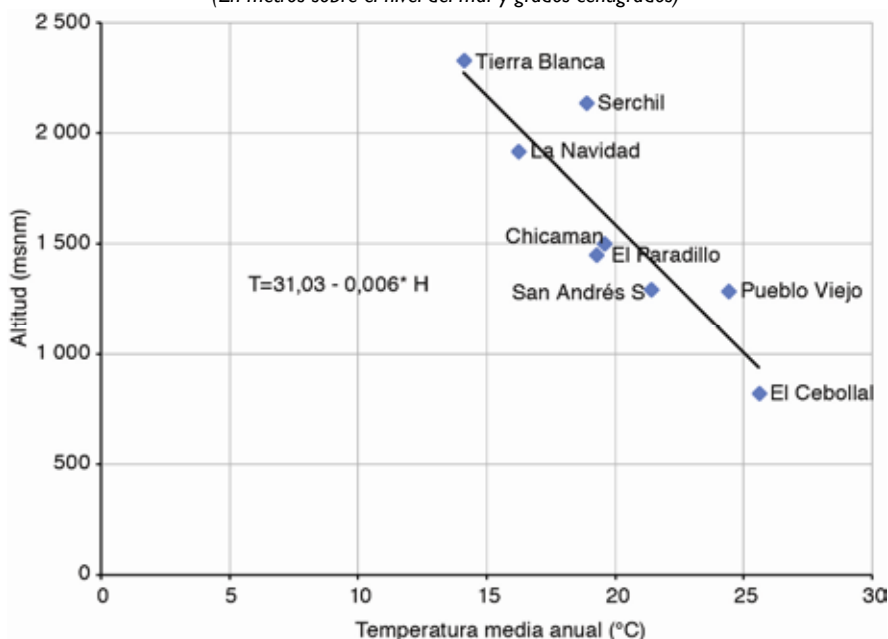
CUADRO 6
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: RELACIÓN TEMPERATURA-ALTITUD, 1979-2008

(En metros sobre el nivel del mar y grados Centígrados)

Estación	Altitud (msnm)	Temperatura Anual (°C)
Tierra Blanca	2 325	14,1
El Paradillo	1 450	19,4
Chicaman	1 500	19,6
San Andrés S.	1 300	21,4
Serchil	2 140	18,9
El Cebollal	821	25,6
Pueblo Viejo	1 289	24,5
La Navidad	1 920	16,3

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 2
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: RELACIÓN TEMPERATURA-ALTITUD, 1979-2008
 (En metros sobre el nivel del mar y grados centígrados)



Fuente: Elaboración propia.

Las series de caudales disponibles fueron completadas mediante correlaciones entre las series de caudales mensuales de las estaciones para formar una serie de 40 años, de 1970 a 2009. Los resultados se incluyen en los cuadros 7 y 8 y se muestran en el gráfico 3 como rendimientos específicos para hacerlos comparables. El rendimiento específico se calcula como el caudal medio del período considerado, dividido entre el área de la cuenca de aporte y se mide en $m^3/s/km^2$, como se muestra en el cuadro 8. Como puede apreciarse, solo la estación Serchil presenta caudales con rendimientos específicos sustancialmente menores a los de las otras estaciones.

CUADRO 7
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: CAUDALES MENSUALES, 1970-2009
 (En metros cúbicos por segundo)

Período	Caudales medios mensuales (m^3/s)					
	Serchil	Pacaranat	La Estancia	Chisiguan	El Cebollal	Camalmapa
Enero	0,69	1,28	4,89	8,36	14,24	2,52
Febrero	0,65	1,12	4,47	7,76	11,71	2,06
Marzo	0,51	0,76	3,97	5,78	9,83	1,56
Abril	0,66	0,96	3,89	6,22	10,42	1,58
Mayo	1,57	2,38	4,86	11,30	17,22	2,42
Junio	7,08	10,72	10,78	39,72	58,57	7,24
Julio	4,49	9,09	11,54	35,73	55,51	6,94
Agosto	4,62	9,64	12,60	36,91	55,21	7,84
Septiembre	11,64	20,99	17,31	73,03	102,03	10,45
Octubre	7,33	14,31	15,24	53,11	77,25	8,97
Noviembre	1,75	4,36	8,77	21,51	32,95	4,85
Diciembre	0,97	2,04	6,59	11,93	19,76	3,28

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 8
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: CAUDALES MENSUALES ESPECÍFICOS, 1970–2009

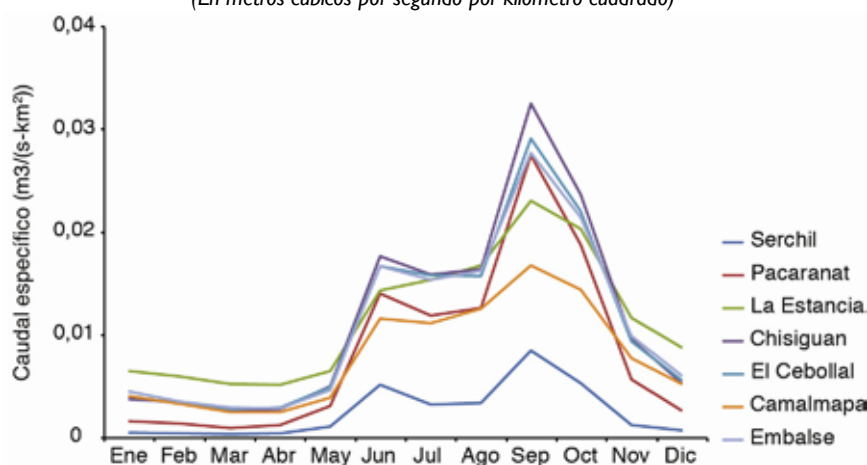
(En metros cúbicos por segundo por kilómetro cuadrado)

Período	Caudales Medios Mensuales ($m^3/s/km^2$)					
	Serchil	Pacaranat	La Estancia	Chisiguan	El Cebollal	Camalmapa
Enero	0,0005	0,0017	0,0065	0,0037	0,0041	0,0041
Febrero	0,0005	0,0015	0,0060	0,0035	0,0033	0,0033
Marzo	0,0004	0,0010	0,0053	0,0026	0,0028	0,0025
Abril	0,0005	0,0013	0,0052	0,0028	0,0030	0,0026
Mayo	0,0011	0,0031	0,0065	0,0050	0,0049	0,0039
Junio	0,0052	0,0140	0,0144	0,0177	0,0167	0,0117
Julio	0,0033	0,0119	0,0154	0,0159	0,0159	0,0112
Agosto	0,0034	0,0126	0,0168	0,0164	0,0158	0,0126
Septiembre	0,0085	0,0275	0,0231	0,0325	0,0291	0,0168
Octubre	0,0054	0,0188	0,0203	0,0237	0,0221	0,0144
Noviembre	0,0013	0,0057	0,0117	0,0096	0,0094	0,0078
Diciembre	0,0007	0,0027	0,0088	0,0053	0,0056	0,0053

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 3
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: HIDROGRAMAS, 1970-2009

(En metros cúbicos por segundo por kilómetro cuadrado)

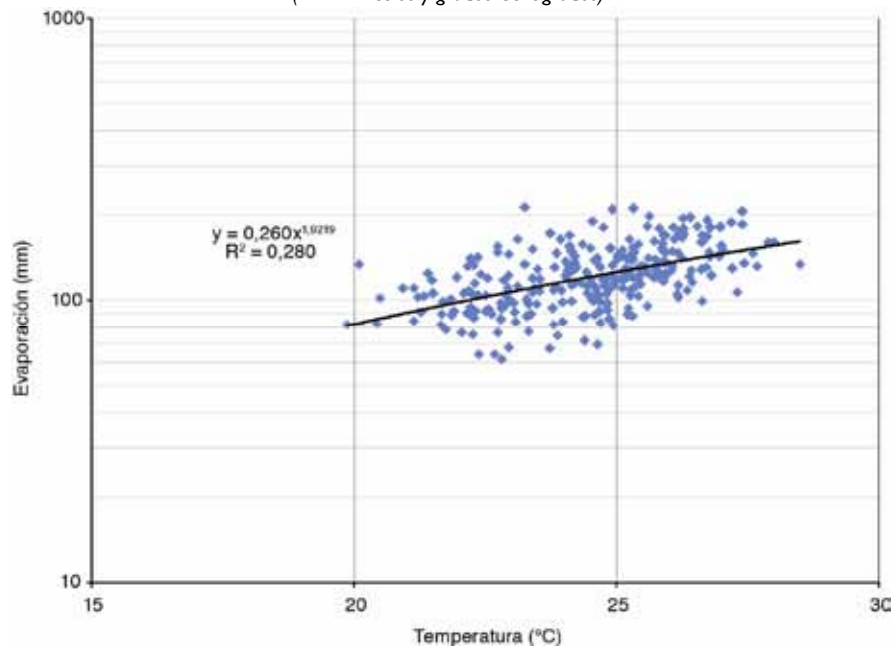


Fuente: Elaboración propia.

La relación entre la evaporación mensual de tanque tipo “A”, es decir, la evaporación de una superficie libre en el embalse del Chixoy y la temperatura media mensual se aprecia en el gráfico 4, mostrando la tendencia de la evaporación a aumentar con la temperatura.

Los resultados del análisis de la evaporación, presentados en el gráfico 4, fueron utilizados para estimar el incremento de las pérdidas de los embalses debido al incremento de la temperatura según los escenarios futuros.

GRÁFICO 4
EMBALSE CHIXOY: RELACIÓN ENTRE TEMPERATURA Y EVAPORACIÓN, 1970-2009
(En milímetros y grados Centígrados)

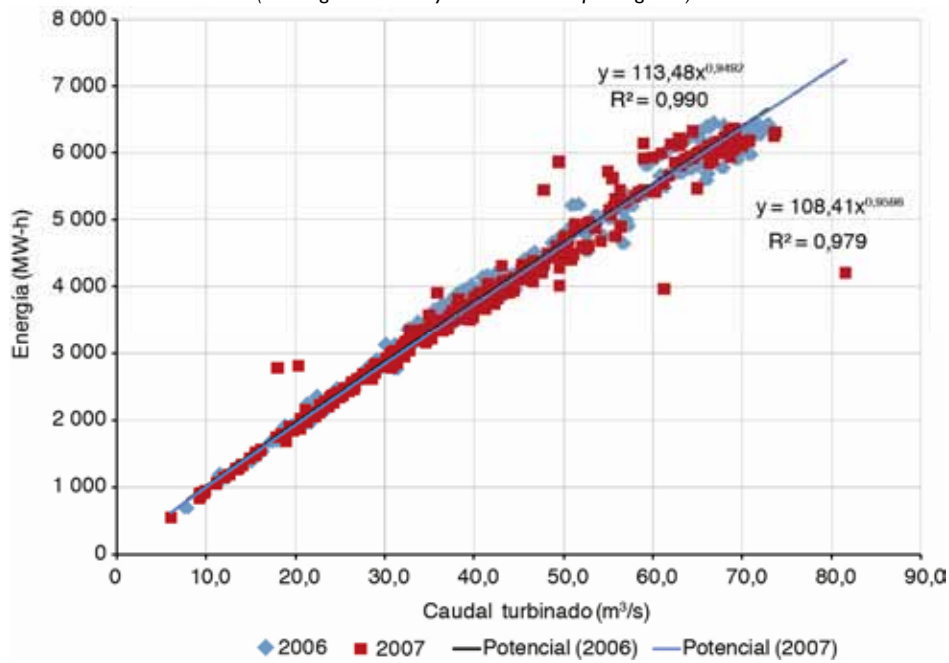


Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de la producción de energía de la planta del Chixoy se contó con información del caudal turbinado y de la energía producida diariamente durante los años 2006 y 2007. La relación entre estos parámetros se muestra en el gráfico 5. Como puede observarse, la relación entre el caudal turbinado y la energía producida en el período 2006-2007 es casi lineal. Una mejor correlación y una mejor descripción de la relación entre ambos parámetros se obtienen utilizando una función potencial.

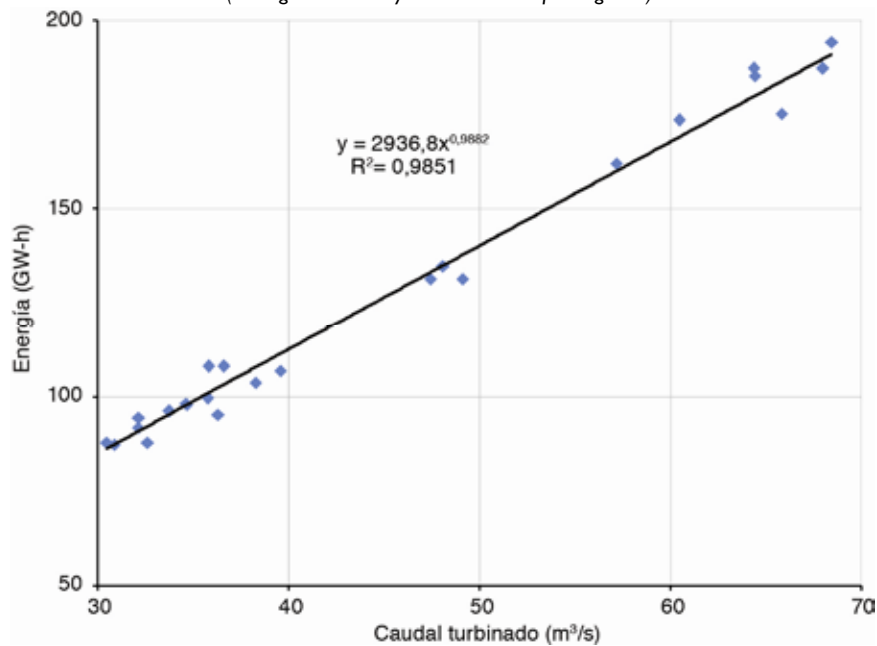
Debido a que la relación entre el caudal y la energía no es completamente lineal, se totalizó la energía mensual y se calculó el promedio del caudal turbinado para cada mes. La comparación entre la energía mensual producida por la planta y el caudal turbinado se muestra en el gráfico 6. Esta comparación se utilizó para describir la relación entre el caudal turbinado mensual y la energía producida por la planta hidroeléctrica del Chixoy. Los datos utilizados para elaborar el gráfico 6 se incluyen en el cuadro 9.

GRÁFICO 5
HIDROELÉCTRICA CHIXOY: RELACIÓN DIARIA CAUDAL TURBINADO-ENERGÍA, 2006 Y 2007
 (En Megawatts-hora y metros cúbicos por segundo)



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 6
HIDROELÉCTRICA CHIXOY: RELACIÓN MENSUAL CAUDAL TURBINADO-ENERGÍA, 2006 Y 2007
 (En Gigawatts-hora y metros cúbicos por segundo)



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 9
PLANTA CHIXOY: ENERGÍA Y CAUDAL TURBINADO MENSUAL, 2006 Y 2007

(En Gigawatts-hora y metros cúbicos por segundo)

2006			2007		
Período	Energía (GW-h)	Caudal Turbinado (m ³ /s)	Período	Energía (GW-h)	Caudal Turbinado (m ³ /s)
Enero	94,4	32,14	Enero	91,7	32,11
Febrero	106,7	39,57	Febrero	87,7	32,62
Marzo	99,5	35,76	Marzo	107,9	36,58
Abril	97,8	34,66	Abril	98,1	34,65
Mayo	87,8	30,48	Mayo	87,3	30,86
Junio	175,2	65,82	Junio	95,1	36,32
Julio	185,2	64,42	Julio	96,0	33,75
Agosto	194,3	68,45	Agosto	131,3	47,42
Septiembre	187,3	67,98	Septiembre	173,5	60,46
Octubre	162,1	57,18	Octubre	187,3	64,35
Noviembre	134,9	48,08	Noviembre	131,3	49,10
Diciembre	103,5	38,25	Diciembre	107,9	35,82

Fuente: Elaboración propia.

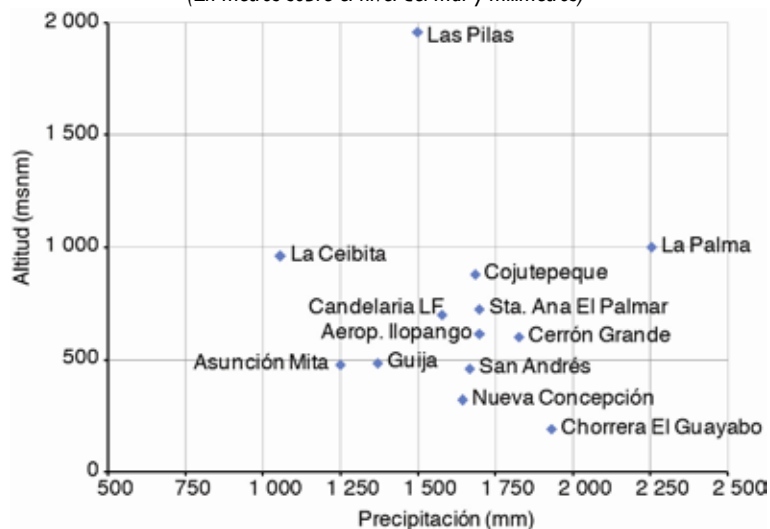
CUENCA DEL RÍO LEMPA

Los datos de precipitación se calcularon a nivel mensual y se obtuvieron los totales anuales para generar promedios de una serie de 1971 a 2008. Las series anuales de precipitación se completaron utilizando ecuaciones de regresión de correlaciones entre las series.

Con las series de precipitación anual completadas se elaboró el gráfico 7, que presenta la variación de la precipitación con la elevación. Los datos de este gráfico se incluyen en el cuadro 10. Los modelos de precipitación ingresados al modelo de simulación fueron elaborados a partir de los datos mostrados en el gráfico 7, los cuales equivalen a los ingresos netos de agua a las subcuencas.

De acuerdo con el gráfico 7, la precipitación en la cuenca del río Lempa parece disminuir con la elevación hasta una altura de alrededor de 1.000 metros. A partir de este nivel, la precipitación podría incrementarse, aunque no hay información para establecerlo. Por otra parte, se observa bastante dispersión en la distribución de la lluvia, lo que probablemente se debe a que el número de estaciones es insuficiente para la extensión de la cuenca.

GRÁFICO 7
CUENCA DEL RÍO LEMPA: RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ALTITUD, 1971–2008
 (En metros sobre el nivel del mar y milímetros)



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 10
CUENCA DEL RÍO LEMPA: RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ALTITUD, 1971–2008
 (En metros sobre el nivel del mar y milímetros)

Estación	Altitud (msnm)	Precipitación (mm)
La Ceibita	960	1 057
Asunción Mita	478	1 250
Santa Ana El Palmar	725	1 699
Guija	485	1 370
Candelaria La Frontera	700	1 578
Chorrera El Guayabo	190	1 932
Cerrón Grande	600	1 826
Nueva Concepción	320	1 645
La Palma	1 000	2 254
Las Pilas	1 960	1 500
San Andrés	460	1 667
Aeropuerto Ilopango	615	1 700
Cojutepeque	880	1 686

Fuente: Elaboración propia.

Los datos de temperatura y precipitación se procesaron a nivel mensual y se obtuvieron los promedios anuales de la serie de datos disponible. La temperatura varía poco a lo largo del año, por lo que no se consideró necesario correlacionar las series para completarlas.

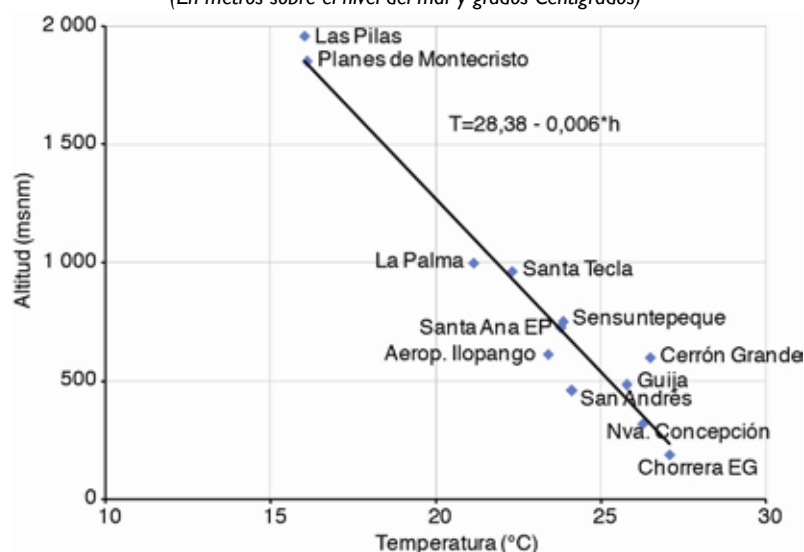
Con las series de temperatura anual incluidas en el cuadro 11 se elaboró el modelo de temperatura-elevación mostrado en el gráfico 8. El modelo está bien definido, como se aprecia en el gráfico, y es utilizado por el programa para estimar las pérdidas por evapotranspiración en la cuenca.

CUADRO II
CUENCA DEL RÍO LEMPA: RELACIÓN TEMPERATURA-ALTITUD, 1971–2008
 (En metros sobre el nivel del mar y grados Centígrados)

Estación	Altitud (msnm)	Temperatura Anual (°C)
Santa Ana El Palmar	725	23,8
Guija	485	25,8
Chorrera El Guayabo	190	27,1
Cerrón Grande	600	26,5
Nueva Concepción	320	26,3
La Palma	1 000	21,1
Las Pilas	1 960	16,0
San Andrés	460	24,1
Aeropuerto Ilopango	615	23,4
Planes de Montecristo	1 851	16,1
Santa Tecla	965	22,3
Sensuntepeque	750	23,9

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 8
CUENCA DEL RÍO LEMPA: RELACIÓN TEMPERATURA-ALTITUD, 1971–2008
 (En metros sobre el nivel del mar y grados Centígrados)



Fuente: Elaboración propia.

Las series de caudales disponibles de las estaciones hidrométricas y de los sitios de las presas fueron completadas mediante correlaciones entre las series de caudales mensuales de las estaciones para formar una serie de 26 años, de 1984 a 2009. Los resultados se incluyen en los cuadros 12 y 13 y se muestran en el gráfico 9, expresados en rendimiento específico para hacerlos comparables. Como puede apreciarse en el gráfico 9, los hidrogramas de las estaciones son muy similares.

CUADRO 12
CUENCA DEL RÍO LEMPA: CAUDALES MENSUALES, 1971–2008

(En metros cúbicos por segundo)

Período	Caudales Medios Mensuales (m ³ /s)					
	Guajoyo	Citala	Zapotillo	Paso Oso	El Tamarindo	Cerrón Grande
Enero	5,55	4,90	26,75	30,37	31,55	14,98
Febrero	4,27	3,86	23,05	27,62	29,14	12,14
Marzo	3,10	2,93	19,25	24,90	25,34	8,99
Abril	2,74	2,67	17,42	24,00	28,35	12,17
Mayo	8,06	6,25	25,36	34,49	42,98	39,37
Junio	39,29	27,86	57,03	112,72	78,56	153,55
Julio	46,05	32,24	69,32	127,26	87,29	199,29
Agosto	45,42	32,00	68,47	131,29	91,22	217,88
Septiembre	76,39	54,65	98,20	198,61	117,03	340,89
Octubre	52,52	37,24	84,48	147,36	92,58	219,16
Noviembre	16,40	13,11	41,98	66,26	49,99	53,66
Diciembre	6,48	6,10	29,31	37,27	37,73	22,68

Fuente: Elaboración propia.

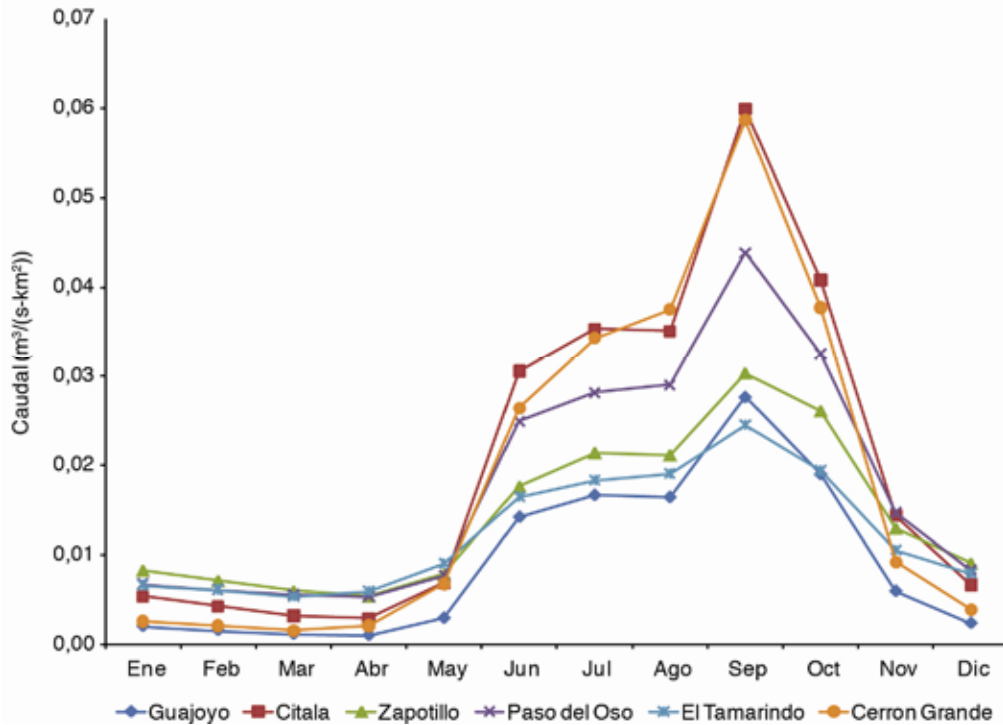
CUADRO 13
CUENCA DEL RÍO LEMPA: CAUDALES MENSUALES ESPECÍFICOS, 1971–2008

(En metros cúbicos por segundo por kilómetro cuadrado)

Período	Caudales Medios Mensuales (m ³ /s/km ²)					
	Guajoyo	Citala	Zapotillo	Paso Oso	El Tamarindo	Cerrón Grande
Enero	0,0020	0,0054	0,0082	0,0067	0,0066	0,0026
Febrero	0,0015	0,0042	0,0071	0,0061	0,0061	0,0021
Marzo	0,0011	0,0032	0,0059	0,0055	0,0053	0,0015
Abril	0,0010	0,0029	0,0054	0,0053	0,0059	0,0021
Mayo	0,0029	0,0068	0,0078	0,0076	0,0090	0,0068
Junio	0,0142	0,0305	0,0176	0,0249	0,0164	0,0264
Julio	0,0166	0,0353	0,0214	0,0281	0,0182	0,0343
Agosto	0,0164	0,0350	0,0211	0,0290	0,0191	0,0375
Septiembre	0,0276	0,0598	0,0303	0,0438	0,0245	0,0586
Octubre	0,0190	0,0407	0,0260	0,0325	0,0193	0,0377
Noviembre	0,0059	0,0143	0,0129	0,0146	0,0104	0,0092
Diciembre	0,0023	0,0067	0,0090	0,0082	0,0079	0,0039

Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 9
CUENCA DEL RÍO LEMPA: HIDROGRAMAS, 1971–2008
(En metros cúbicos por segundo por kilómetro cuadrado)

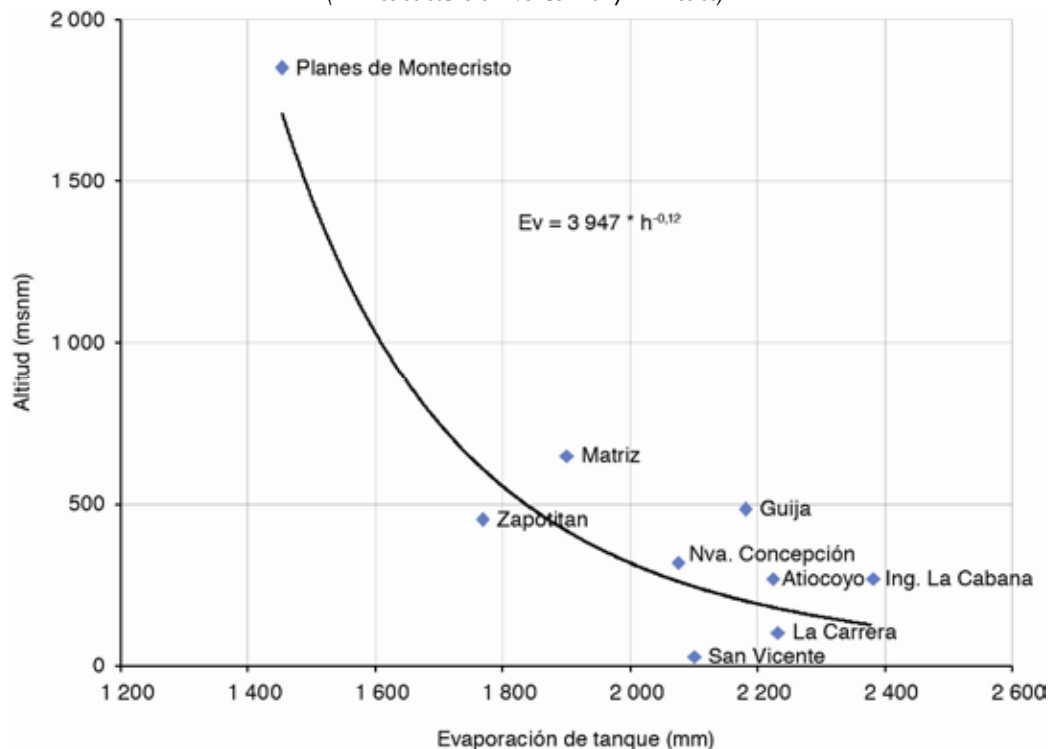


Fuente: Elaboración propia.

No se cuenta con información de evaporación de superficies libres en el sitio del embalse de Cerrón Grande. Por esta razón se procesaron los datos de evaporación mensual de tanque tipo “A”, es decir, la evaporación de una superficie libre de varias estaciones en la cuenca y sus cercanías. La relación entre la evaporación y la elevación de las estaciones se muestra en el gráfico 10. Los datos de este gráfico se incluyen en el cuadro 14. El gráfico 10 muestra la tendencia de la evaporación a disminuir con la elevación.

Los resultados del análisis de la evaporación, los cuales se presentan en el gráfico 10, se utilizaron para estimar el incremento de las pérdidas en los embalses debido al incremento de la temperatura según los escenarios futuros.

GRÁFICO 10
CUENCA DEL RÍO LEMPA: RELACIÓN ENTRE LA ALTITUD Y LA EVAPORACIÓN, 1971–2008
 (En metros sobre el nivel del mar y milímetros)



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 14
CUENCA DEL RÍO LEMPA: RELACIÓN EVAPORACIÓN-ALTITUD, 1971–2008
 (En metros sobre el nivel del mar y milímetros)

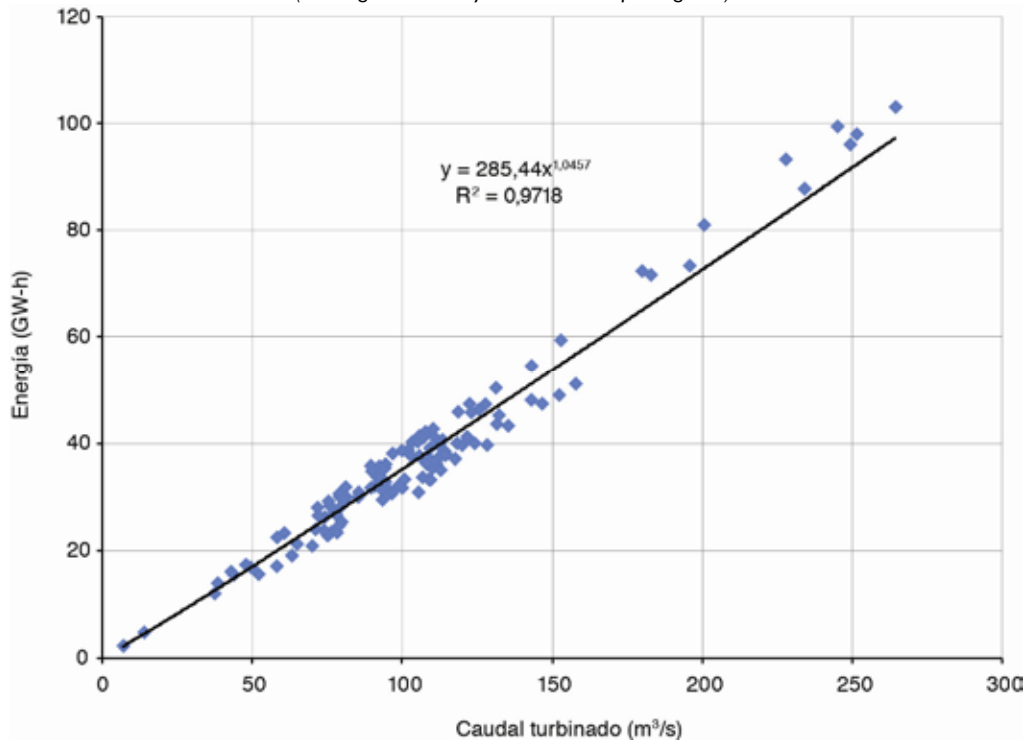
Estación	Altitud (msnm)	Evaporación (mm)
Nueva Concepción	320	2 076
Matriz	650	1 901
San Vicente	30	2 102
Guija	485	2 182
Planes de Montecristo	1 851	1 452
La Carrera	105	2 232
Zapotitan	453	1 769
Atiocoyo	270	2 224
Ingenio La Cabaña	270	2 378

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de la producción de energía de Cerrón Grande se compararon los caudales turbinados mensuales promedio con la producción de energía del mes respectivo entre enero de 2000 y diciembre de 2009, sin considerar las posibles variaciones debidas a la diferencia de niveles del embalse.

Debido a que la relación entre el caudal y la energía no es lineal, se comparó la energía generada cada mes con el caudal turbinado del mismo mes. La comparación se muestra en el gráfico 11 y los datos se incluyen en los cuadros 15 y 16.

GRÁFICO 11
HIDROELÉCTRICA CERRÓN GRANDE: RELACIÓN MENSUAL CAUDAL TURBINADO-ENERGÍA, 2000-2009
 (En Megawatts-hora y metros cúbicos por segundo)



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 15
PLANTA CERRÓN GRANDE: CAUDAL TURBINADO MENSUAL, 2000-2009
 (En metros cúbicos por segundo)

Período	Caudal Turbinado (m³/s)									
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Enero	125,34	73,95	79,52	101,74	71,55	78,74	104,92	106,65	93,94	93,46
Febrero	142,80	96,27	93,19	118,05	75,61	94,11	111,62	113,93	108,03	107,73
Marzo	157,61	111,97	94,04	113,19	102,72	110,37	112,06	109,11	105,47	109,02
Abril	57,96	135,09	99,75	108,21	121,38	132,03	111,14	114,44	114,04	110,99
Mayo	79,59	109,17	74,89	73,58	119,75	146,42	117,38	123,93	106,54	100,50
Junio	128,06	105,19	51,91	62,99	109,86	108,59	98,42	78,03	78,68	152,08
Julio	112,59	69,75	94,67	77,91	93,16	89,36	195,61	73,93	80,07	131,31
Agosto	37,23	64,71	76,12	77,17	85,10	122,81	182,69	70,86	251,31	49,33
Septiembre	38,26	13,75	6,83	42,74	47,64	233,92	264,28	127,47	249,15	43,61
Octubre	94,18	91,39	60,46	105,56	89,30	227,66	200,42	179,76	244,89	58,05
Noviembre	90,65	85,27	71,77	99,67	92,16	122,21	152,68	131,02	142,88	89,66
Diciembre	81,24	92,00	78,90	80,90	75,19	103,15	107,51	118,43	110,04	96,59

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 16
PLANTA CERRÓN GRANDE. ENERGÍA MENSUAL, 2000-2009

(En Gigawatts-hora)

Período	Energía (GW-h)									
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Enero	46,3	26,3	28,3	38,7	28,0	30,6	40,3	40,9	35,5	35,1
Febrero	48,1	30,6	29,5	40,0	28,4	32,8	37,2	38,5	37,6	36,3
Marzo	51,2	39,9	31,9	40,7	37,7	41,2	39,6	39,2	37,7	39,1
Abril	17,1	43,3	31,7	36,1	41,2	45,3	36,1	37,9	37,8	36,6
Mayo	25,3	33,2	22,8	23,8	39,7	47,4	37,1	40,0	33,7	33,3
Junio	39,7	30,9	15,6	19,1	35,4	33,3	32,0	23,3	24,6	49,1
Julio	35,0	20,8	30,4	26,6	31,3	31,7	73,4	23,6	29,8	43,6
Agosto	12,0	21,2	23,4	27,1	30,0	45,8	71,7	23,9	98,1	16,9
Septiembre	13,9	4,7	2,2	16,1	17,4	87,9	103,2	47,3	96,1	15,5
Octubre	36,1	33,7	23,3	41,4	35,8	93,3	81,1	72,4	99,5	22,4
Noviembre	32,0	30,9	26,5	38,6	35,7	47,4	59,4	50,4	54,6	34,8
Diciembre	29,9	33,9	30,1	31,9	29,2	40,3	42,1	45,9	42,7	38,1

Fuente: Elaboración propia.

3. SIMULACIÓN DE CAUDALES

La simulación de caudales comprende la estimación de éstos mediante el balance de cada cuenca. Para ello se utilizó el programa *Water and Power Potential* (WAPPO, por sus siglas en inglés). Este programa ha sido utilizado en varias evaluaciones del potencial de recursos hidroenergéticos en el Perú, Pakistán y Guatemala, entre otros. En las referencias se incluyen experiencias de su aplicación en Pakistán y Guatemala.

WAPPO utiliza funciones de los principales parámetros del ciclo hidrológico en relación con la altitud. Los parámetros del ciclo hidrológico muestran una buena correlación con la elevación debido a que en primera instancia la lluvia muestra una fuerte influencia de la orografía en la mayor parte de las regiones del planeta. La temperatura, que determina en gran medida las pérdidas por evapotranspiración, también está estrechamente relacionada con la altitud, según las regiones.

La información hidrometeorológica para simular caudales no es muy abundante en los países en desarrollo. Por esta razón se utiliza el programa WAPPO, que emplea información meteorológica que normalmente se encuentra disponible, al igual que la información geomorfológica que puede obtenerse de modelos de información geográfica, disponibles de todo el mundo.

La información geomorfológica fue obtenida por el CATIE mediante un modelo de elevación digital de 90 metros que utiliza la herramienta RiverTools 3.0 con un límite de cuatro en la clasificación de Strahler para mantener una red de drenaje con menos de 1.000 elementos. Las subcuencas correspondientes fueron generadas utilizando los modelos de la red de drenajes y de elevación digital ya descritos. Los datos fueron procesados con un script de AML (Arcinfo Macro Language) y ejecutado en Arcinfo Workstation 9.1. Los datos de altitud promedio, precipitación y temperatura de cada subcuenca se calcularon como el promedio de todos los píxeles al interior de cada subcuenca y fueron procesados en ArcGIS Desktop 9.3.

El modelo integra y da consistencia a la información meteorológica, geomorfológica e hidrológica, por lo que permite evaluar la calidad de la información e identificar diferencias entre regiones.

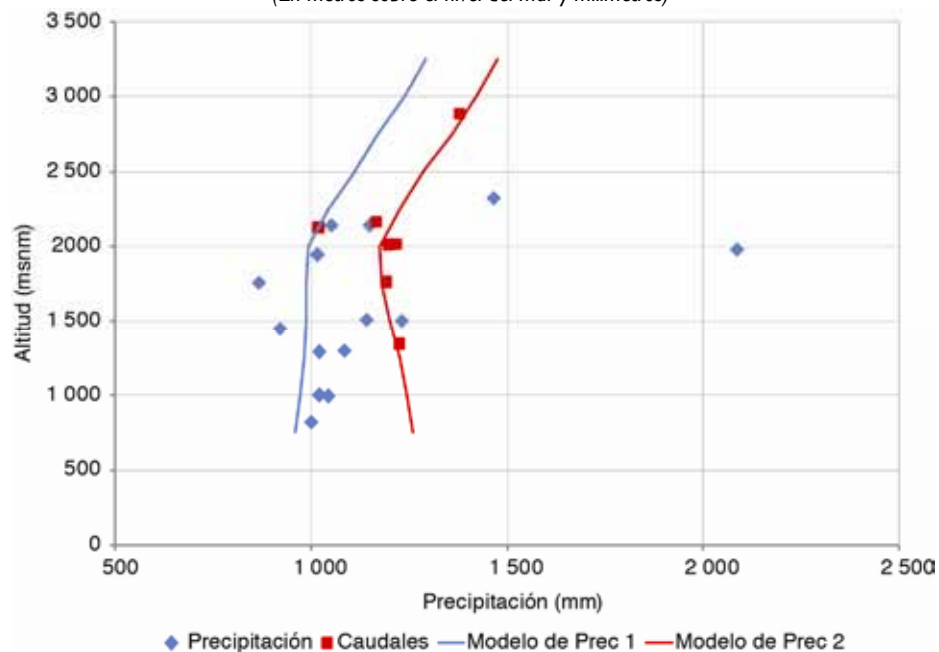
SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY

La cuenca del río Chixoy fue simulada estableciendo la mejor relación entre precipitación y altitud para las condiciones de temperatura y geomorfología de la cuenca en dos fases. La primera fase consistió en la simulación de los caudales, utilizando la mejor estimación de la relación precipitación-altitud permitida por los datos. La segunda fase consistió en obtener las altitudes medias de los sitios de las estaciones y se calcularon las curvas hipsométricas de las cuencas hasta esos mismos sitios. Una vez obtenidas las elevaciones medias de las cuencas, se pueden comparar los rendimientos unitarios de los caudales y la lluvia equivalente hasta los sitios de las estaciones.

En el gráfico 12 se muestra la comparación de los datos de lluvia de las estaciones meteorológicas, los de la lluvia equivalente de los caudales de las estaciones hidrométricas y las curvas de precipitación con respecto a la elevación. Como puede observarse, para obtener resultados satisfactorios se utilizaron dos modelos de precipitación. Esto se debe a que la estación Pacaranat presenta caudales muy bajos, a pesar de que la cuenca alcanza elevaciones relativamente altas. El primer modelo de precipitación corresponde a las partes bajas de la cuenca, mientras que el segundo corresponde a zonas más elevadas.

Como puede observarse en el gráfico 12, la precipitación permanece prácticamente constante en elevaciones menores a 2.000 msnm, variando entre los 900 mm y los 1.300 mm, como indican las estaciones meteorológicas. La precipitación aumenta en elevaciones mayores, como indica una de las estaciones hidrométricas, confirmando la importancia de la orografía en relación con el volumen de lluvia, que es el principio del modelo.

GRÁFICO 12
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: RELACIÓN ENTRE PRECIPITACIÓN Y ALTITUD, 1979–2008
 (En metros sobre el nivel del mar y milímetros)



Fuente: Elaboración propia.

Como se ha indicado, la relación entre la temperatura y la altitud mostrada en el gráfico 2 se utiliza para estimar las pérdidas por evapotranspiración. La evapotranspiración fue calculada con la fórmula de Turc. Esta fórmula se utiliza en hidrología para estimar la evapotranspiración real, es decir, la que se produce cuando el volumen de agua no es ilimitado. Otras fórmulas, como Thornthwaite, Penmann, Hargreaves y otras, estiman la evapotranspiración potencial, es decir, el límite de evapotranspiración máxima cuando el agua susceptible de evapotranspiración es ilimitada.

$$EVT = \frac{P}{(0.9 + (P/FL)^2)^{0.5}}$$

Donde:

$$FL = 300 + (25 * T) + (0.05 * T)^3$$

EVT = Evapotranspiración real anual (mm)

P = Precipitación anual (mm)

T = Temperatura media anual (°C)

En el cuadro 17 se incluyen las diferencias obtenidas de las estimaciones de caudales en los sitios de las estaciones. Los resultados de la simulación anual de las cuencas se incluyen en la sección 4.

CUADRO 17
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: DIFERENCIAS ENTRE ESTIMACIONES Y MEDICIONES DE CAUDAL,
1979-2008

(En metros cúbicos por segundo y porcentajes)

Número de Nodo	Estación	Caudales (m ³ /s)		Diferencia	
		Estimados	Medidos	m ³ /s	%
21	Pacaranat	6,62	6,47	0,15	2,36
34	Serchil	3,45	3,50	-0,05	-1,37
58	La Estancia	8,80	8,74	0,06	0,70
69	Chisiguan	26,78	25,95	0,83	3,18
105	El Cebollal	36,66	38,73	-2,08	-5,36
186	Camalmapa	4,89	4,98	-0,09	-1,72
193	Embalse	55,65	54,99	0,66	1,20

Fuente: Elaboración propia.

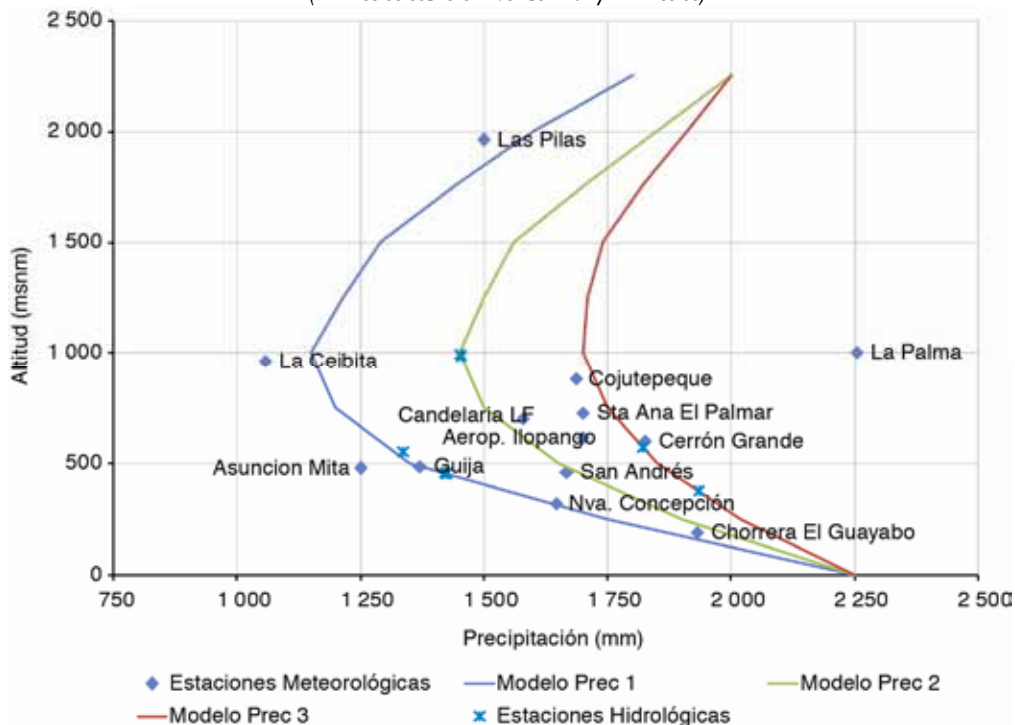
SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO LEMPA

La cuenca del río Lempa fue simulada estableciendo la mejor relación entre la precipitación y la altitud para las condiciones de temperatura y geomorfología de la cuenca en dos fases. La primera fase consistió en simular los caudales, utilizando la mejor estimación de la relación precipitación-altitud permitida por los datos de lluvia. La segunda fase consistió en obtener las altitudes medias hasta los sitios de las estaciones y calcular las curvas hipsométricas de las cuencas hasta esos mismos sitios. Una vez obtenidas las elevaciones medias de las cuencas, los rendimientos unitarios de los caudales y la lluvia equivalente hasta los sitios de las estaciones se pueden comparar con los datos de lluvia de las estaciones meteorológicas.

En el gráfico 13 se muestra la comparación de los datos de lluvia de las estaciones meteorológicas, los de la lluvia equivalente de los caudales de las estaciones hidrométricas y las curvas de precipitación relacionadas con la altitud. Como puede observarse, se utilizaron tres modelos de precipitación para obtener resultados satisfactorios. Esto se debe a que el régimen de lluvias de esta cuenca presenta tres regiones y es más complejo que el de Chixoy. La primera región es la menos lluviosa y se localiza en el centro y sur de la cuenca (primer modelo de precipitación); la segunda es más húmeda y se localiza en el extremo oriental de la cuenca (segundo modelo de precipitación); la tercera es la más lluviosa y se localiza cerca del embalse de Cerrón Grande y al norte de la cuenca (tercer modelo de precipitación).

Como puede observarse en este mismo gráfico, la precipitación disminuye entre las elevaciones de cero a unos 1.000 msnm. A partir de los 1.000 msnm, la lluvia se incrementa. Lo anterior es una interpretación del autor, sustentada en los datos de las estaciones meteorológicas e hidrométricas, pero la información de lluvia a elevaciones mayores de 1.000 msnm es muy escasa.

GRÁFICO 13
CUENCA DEL RÍO LEMPA: RELACIÓN ENTRE LA PRECIPITACIÓN Y LA ALTITUD, 1971–2008
(En metros sobre el nivel del mar y milímetros)



Fuente: Elaboración propia.

Como ya se ha indicado, la relación entre la temperatura y la altitud mostrada en el gráfico 8 se utiliza para estimar las pérdidas por evapotranspiración. La evapotranspiración real fue calculada con la fórmula de Turc.

En el cuadro 18 se incluyen las diferencias obtenidas de las estimaciones de caudales en los sitios de las estaciones. Los resultados de la simulación anual de las cuencas se incluyen en la sección 4.

CUADRO 18
CUENCA DEL RÍO LEMPA: DIFERENCIAS ENTRE ESTIMACIONES Y MEDICIONES DE CAUDAL, 1971–2008
(En metros cúbicos por segundo y porcentajes)

Número de Nodo	Estación	Caudales (m ³ /s)		Diferencia	
		Estimados	Medidos	m ³ /s	%
109	Guajoyo	25,90	25,52	0,38	1,49
154	Citala	20,14	18,65	1,49	8,00
169	Zapotillo	54,67	46,72	7,95	17,02
334	Cerrón Grande	104,97	107,90	-2,92	-2,71

Fuente: Elaboración propia.

4. SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

La base de datos meteorológicos utilizada corresponde a la información mensual de temperaturas máxima, mínima, media y precipitación acumulada a nivel departamental para el promedio del período 1961 a 1990 y escenarios futuros con cortes a los años 2020, 2030, 2050, 2070 y 2100.¹ Esta información fue preparada por el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) para el proyecto “La economía del cambio climático en Centroamérica” (CEPAL, CCAD/SICA, UKAID y DANIDA, 2011). El estudio utiliza los escenarios de emisiones B2 y A2 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2000) con información correspondiente al promedio de los modelos de circulación general ECHAM4 y HADCM3 para B2 y ECHAM4 y HADGEM para A2.²

ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

El escenario A2, el más pesimista, prevé un mayor incremento de la temperatura y una disminución sustancial de la lluvia con el tiempo en la mayor parte de la región. Este escenario resultaría de continuar las tendencias actuales de desarrollo económico y socio-demográfico, donde los patrones de fertilidad de las regiones convergen lentamente (población mundial creciente) y el desarrollo económico se orienta en forma regional, mientras que el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico ocurren en forma lenta y desigual. El escenario B2 prevé una disminución menor de la lluvia y un incremento menor de la temperatura. Este escenario menos pesimista, plantea soluciones locales a los problemas económicos, sociales y de sustentabilidad ambiental, la población mundial crece constantemente (a tasas menores que en A2) y se observan niveles medios de desarrollo económico, orientados a la protección ambiental y la equidad social.

La estadística muestra que la temperatura ha aumentado y los escenarios de cambio climático prevén que seguirá aumentando. Sin embargo, los estudios de los registros históricos de la precipitación indican que los volúmenes han variado durante las últimas décadas, dependiendo de la ubicación de las estaciones meteorológicas. A manera de ejemplo se incluyen los gráficos 14 y 15, que muestran los datos de temperatura, precipitación y días de lluvia de las estaciones Observatorio Nacional (INSIVUMEH) de Guatemala y Aeropuerto Ilopango de El Salvador, que cuentan con registros extensos.

El gráfico 14 muestra que la temperatura se ha incrementado en forma sostenida desde la década de 1940 hasta la de 2000-2010 en cerca de 1,5 °C en promedio. El gráfico 15 muestra un

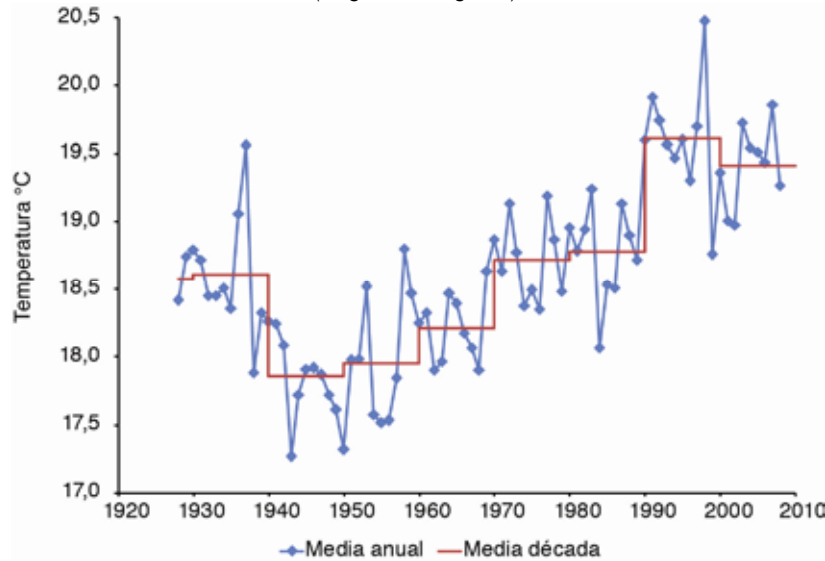
¹ Los años de corte 2020, 2030, 2050, 2070 y 2100 se refieren a información promedio de períodos de diez años: 2016-2025 (corte 2020), 2026-2035 (corte 2030), 2046-2055 (corte 2050), 2066-2075 (corte 2070) y 2091-2100 (corte 2100).

² Para más información sobre la base de datos climática utilizada, véase capítulo 1 en CEPAL, CCAD/SICA, UKAID y DANIDA (2011).

incremento sostenido de la temperatura en cerca de 1 °C desde la década de 1960 hasta el corte 2010, lo que confirma los datos del gráfico 14. Es de notar que el gráfico 14 muestra un descenso de la temperatura entre las décadas de 1930 y 1940.

GRÁFICO 14
GUATEMALA: ESTACIÓN INSIVUMEH, TEMPERATURA MEDIA, 1920-2010

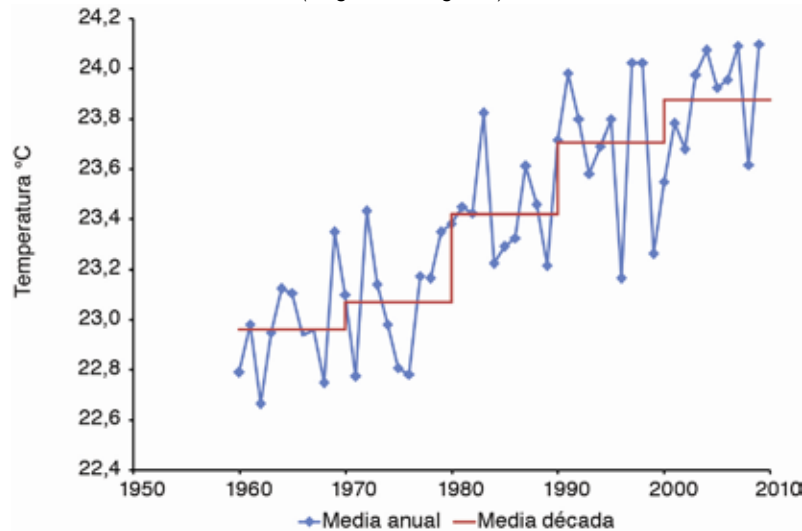
(En grados Centígrados)



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 15
EL SALVADOR: ESTACIÓN AEROPUERTO ILOPANGO, TEMPERATURA MEDIA, 1950-2010

(En grados Centígrados)

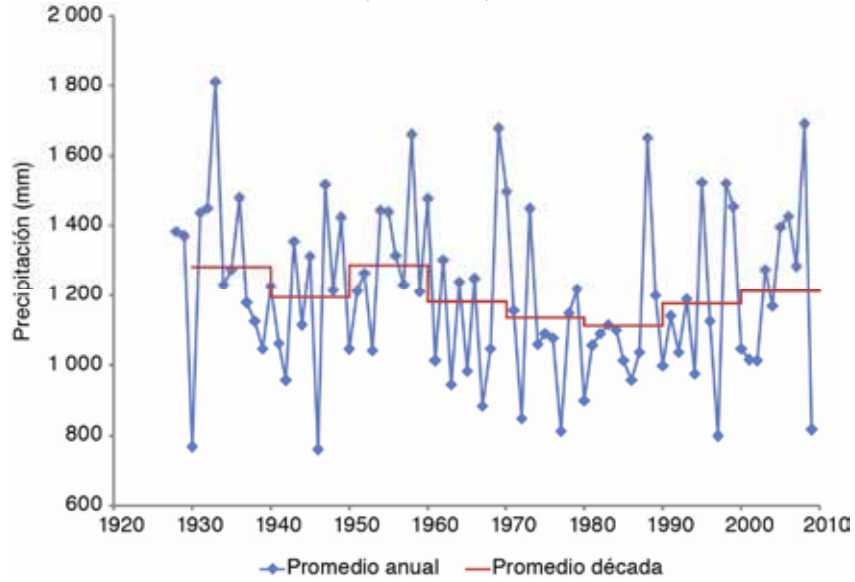


Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 16 muestra que la precipitación media anual en la estación INSIVUMEH se redujo desde la década de 1930 hasta la de 1980 en una proporción mayor del 10% respecto del período precedente. Sin embargo, a partir de la década de 1980, el promedio se ha incrementado ligeramente

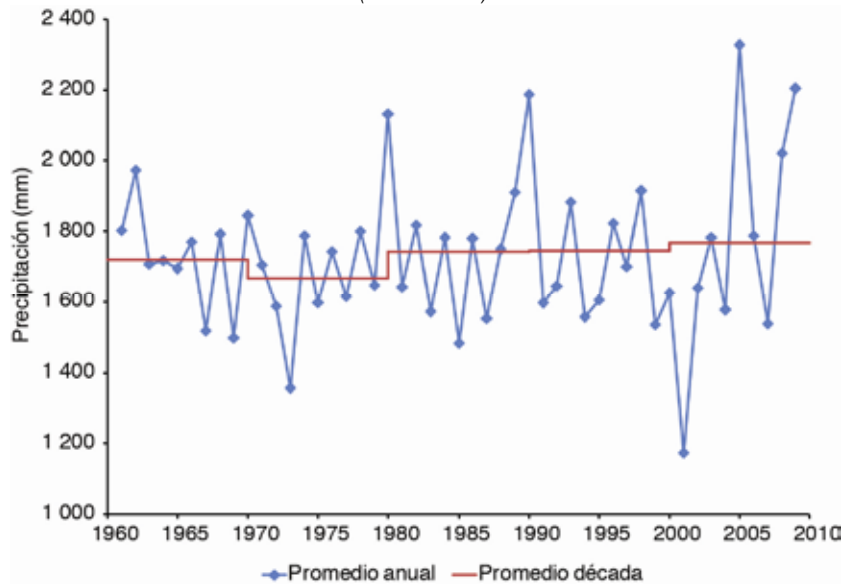
en las décadas subsiguientes. La precipitación en la estación Ilopango se ha incrementado desde la década de 1970, como se muestra en el gráfico 17.

GRÁFICO 16
GUATEMALA: ESTACIÓN INSIVUMEH, PRECIPITACIÓN ACUMULADA, 1920-2010
 (En milímetros)



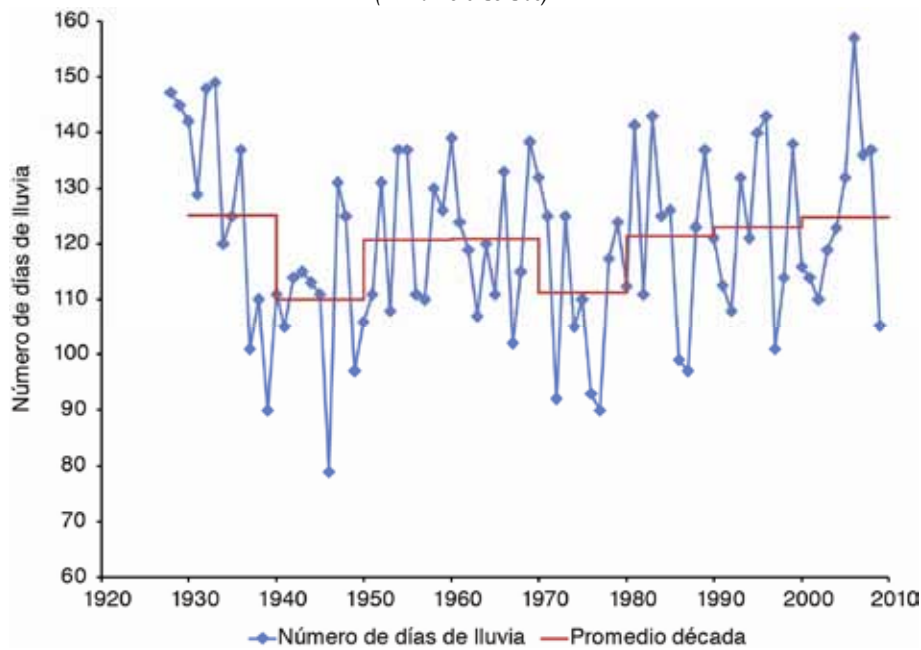
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 17
EL SALVADOR: ESTACIÓN ILOPANGO, PRECIPITACIÓN ACUMULADA, 1960-2010
 (En milímetros)



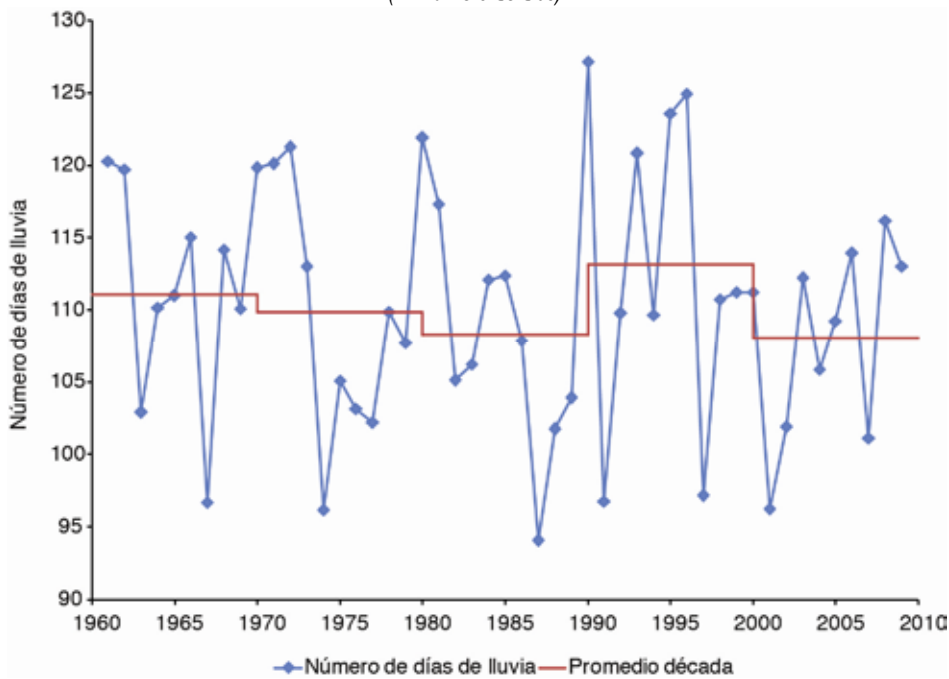
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 18
GUATEMALA: ESTACIÓN INSIVUMEH, NÚMERO DE DÍAS DE LLUVIA, 1920-2010
 (En número de días)



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 19
EL SALVADOR: ESTACIÓN ILOPANGO, NÚMERO DE DÍAS DE LLUVIA, 1960-2010
 (En número de días)



Fuente: Elaboración propia.

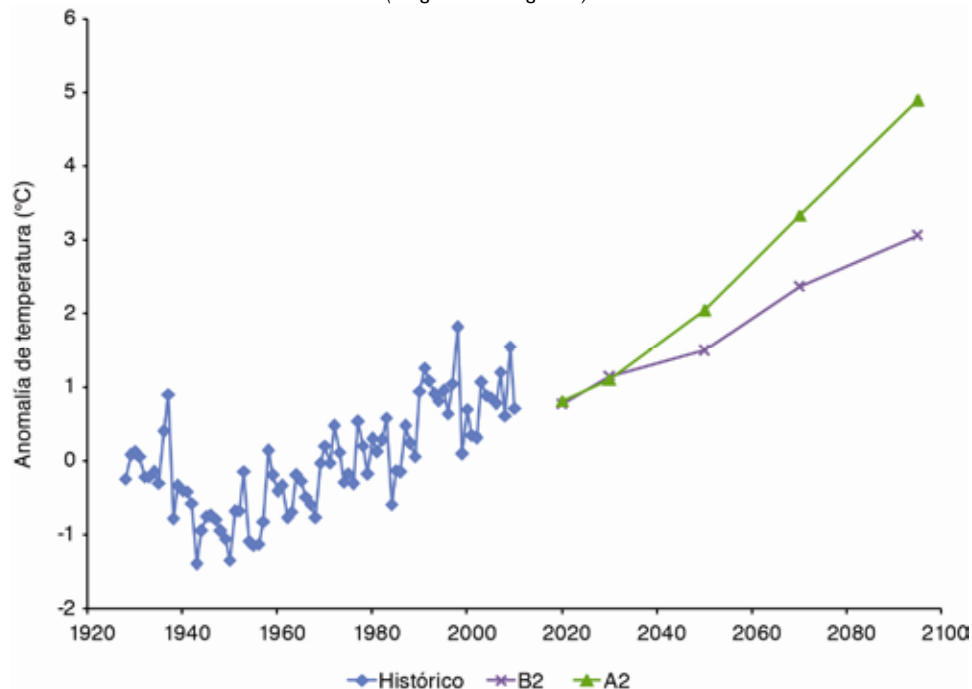
El gráfico 18 muestra que el promedio de días de lluvia por década se ha incrementado en forma sostenida en la estación INSIVUMEH desde la década de 1940. El gráfico 19 muestra que los días de lluvia en Ilopango se han reducido desde la década de 1960 hasta el presente, pero en la década de 1990 aumentaron en forma significativa. Esta información no es concluyente y se requieren análisis más profundos y con más información. Los gráficos 14 a 19 indican que el incremento de la temperatura no se relaciona con el volumen de precipitación. La información sobre la distribución de la lluvia en el tiempo no muestra la misma tendencia en las estaciones examinadas.

Los gráficos 20, 21, 22 y 23 muestran las series históricas de temperatura y precipitación de las mismas estaciones y las tendencias en los escenarios de cambio climático.

Los gráficos 20 a 23 muestran que la temperatura se incrementa de manera acelerada de acuerdo con los escenarios de cambio climático. En el caso de la lluvia ha habido años en los que ha sido tan baja como lo prevén los escenarios de cambio climático más severos, si bien la tendencia no es histórica.

GRÁFICO 20
GUATEMALA: ESTACIÓN INSIVUMEH, CAMBIO DE TEMPERATURA MEDIA,
ESCENARIOS B2 Y A2, 1920-2100

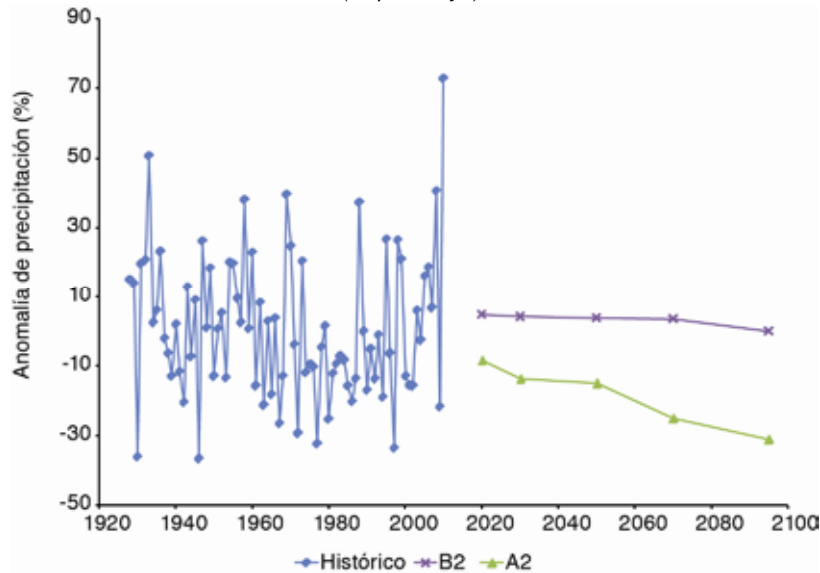
(En grados Centígrados)



Nota: Para calcular las anomalías se tomó el clima del año señalado respecto a la climatología 1961–1990 a partir del promedio de los modelos referidos.

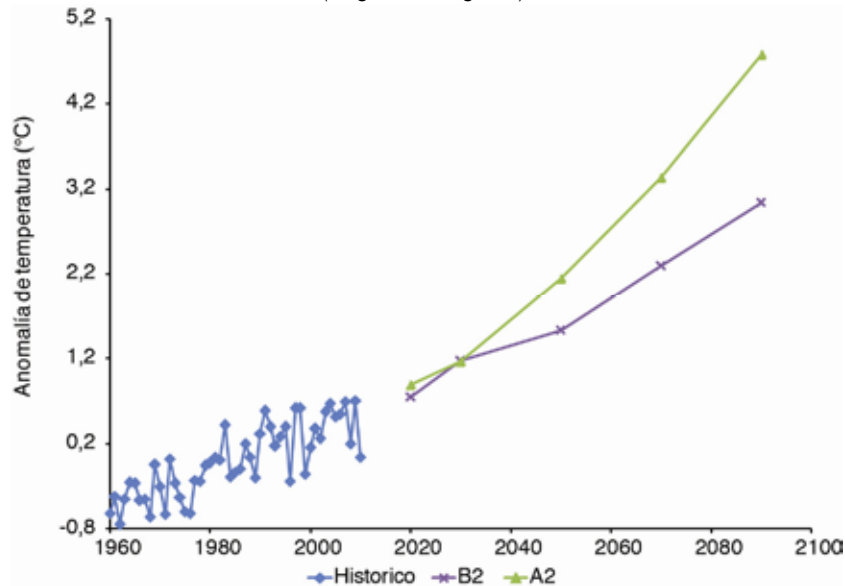
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 21
GUATEMALA: ESTACIÓN INSIVUMEH, CAMBIO DE PRECIPITACIÓN ACUMULADA,
ESCENARIOS B2 Y A2, 1920-2100
(En porcentajes)



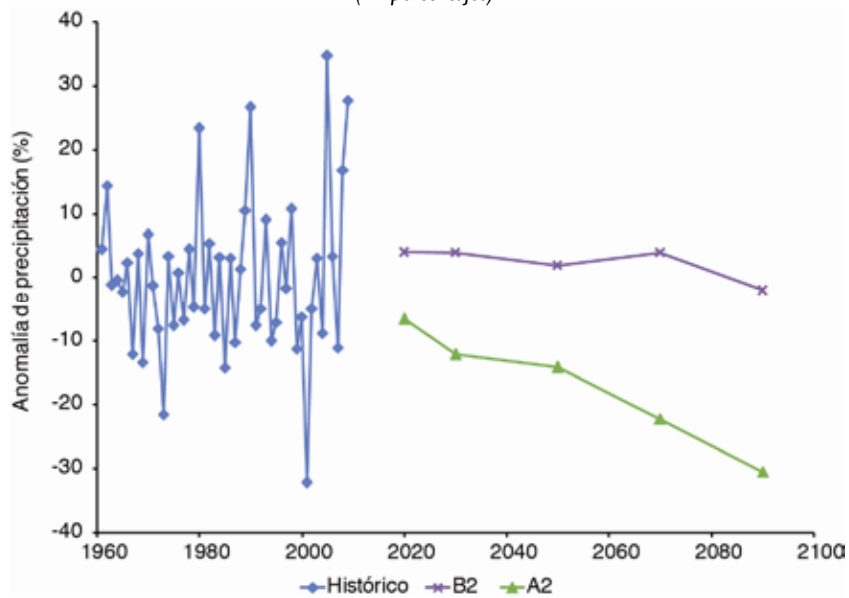
Nota: Para calcular las anomalías se tomó el clima del año señalado respecto a la climatología 1961–1990 a partir del promedio de los modelos referidos.
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 22
EL SALVADOR: ESTACIÓN ILOPANGO, CAMBIO DE TEMPERATURA MEDIA,
ESCENARIOS B2 Y A2, 1940-2100
(En grados Centígrados)



Nota: Para calcular las anomalías se tomó el clima del año señalado respecto a la climatología 1961–1990 a partir del promedio de los modelos referidos.
Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 23
EL SALVADOR: ESTACIÓN ILOPANGO, CAMBIO DE PRECIPITACIÓN ACUMULADA,
ESCENARIOS B2 Y A2, 1960-2100
 (En porcentajes)



Nota: Para calcular las anomalías se tomó el clima del año señalado respecto a la climatología 1961–1990 a partir del promedio de los modelos referidos.
 Fuente: Elaboración propia.

Una conclusión evidente de este trabajo es que la precipitación es el parámetro que determina en mayor medida la disponibilidad de agua en las cuencas. Por su importancia en el ciclo hidrológico, la generación de energía y todas las actividades relacionadas con los recursos hídricos, se requiere continuar el análisis con evidencias de la naturaleza de los eventos y evidencias históricas para confirmar o modificar los escenarios de cambio climático.

SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY

SIMULACIÓN HIDROLÓGICA

Para cada escenario climático se utilizó el promedio de los tres modelos de clima: HADCM3, GFDL R30 y ECHAM 4 para B2, y HADGEM1, GFDL CM2.0 y ECHAM5 para A2. Las anomalías de los departamentos que forman parte de las cuencas fueron calculadas con el promedio de sus valores.

En el cuadro 19 se muestra el promedio de las anomalías en porcentaje de la precipitación acumulada para los departamentos Alta Verapaz, Baja Verapaz, El Progreso, Huehuetenango, Quetzaltenango, El Quiché y Totonicapán, ubicados en la cuenca del Chixoy en Guatemala. Estos porcentajes fueron utilizados para calcular la precipitación para los escenarios B2 y A2. En el cuadro 20 se incluyen las anomalías de temperatura en grados centígrados, las cuales fueron utilizadas para calcular la temperatura en ambos escenarios.

CUADRO 19
RÍO CHIXOY: CAMBIOS DE PRECIPITACIÓN ACUMULADA EN LOS DEPARTAMENTOS
DE LA CUENCA, ESCENARIOS B2 Y A2, 2020 A 2100

(En porcentajes)

Año	Anomalía (%)	
	B2	A2
2020	4,62	-8,47
2030	4,00	-13,71
2050	3,63	-15,12
2070	3,35	-25,12
2100	-0,05	-31,08

Nota: Para calcular las anomalías se tomó el clima del año señalado respecto a la climatología 1961–1990 a partir del promedio de los modelos referidos.

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 20
RÍO CHIXOY: CAMBIO DE TEMPERATURA MEDIA EN LOS DEPARTAMENTOS
DE LA CUENCA, ESCENARIOS B2 Y A2, 2020 A 2100

(En grados Centígrados)

Año	Anomalía (°C)	
	B2	A2
2020	0,77	0,81
2030	1,14	1,10
2050	1,50	2,05
2070	2,37	3,34
2100	3,06	4,89

Nota: Para calcular las anomalías se tomó el clima del año señalado respecto a la climatología 1961–1990 a partir del promedio de los modelos referidos.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de precipitación y temperatura obtenidos para los escenarios fueron aplicados a los modelos de precipitación y temperatura obtenidos del modelo hidrológico (véanse gráficos 1 y 12). Los modelos de precipitación resultantes se incluyen en los cuadros 21, 22, 23 y 24 para ambos escenarios. En el escenario menos pesimista (B2), con el primer modelo de precipitación (zonas bajas), la precipitación se comporta de manera estable hasta los 2.000 msnm; en mayores altitudes aumenta considerablemente. En el segundo modelo (zonas altas), la precipitación disminuye ligeramente hasta los 2.000 msnm; en mayores niveles de altitud aumenta considerablemente con un comportamiento similar al del primer modelo. En el escenario más pesimista (A2), los niveles de precipitación respecto a la altitud muestran un comportamiento similar que en el escenario menos pesimista, aunque a menores niveles de precipitación.

En el escenario menos pesimista la precipitación aumenta en general respecto a sus niveles históricos hacia el corte 2020 en los niveles de altitud considerados, para disminuir progresivamente hasta cerca de sus valores históricos hacia finales de siglo. En el caso del escenario A2, la reducción de la precipitación es progresiva hacia el corte 2100. Este escenario arroja niveles de precipitación equivalentes a 69% del nivel histórico.

CUADRO 21
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: MODELO DE PRECIPITACIÓN NUM.1, ESCENARIO B2, 2020 A 2100
 (En milímetros)

Elevación	Precipitación (mm)					
	Promedio Histórico	2020	2030	2050	2070	2100
750	958	1 002	996	993	990	957
1 000	973	1 018	1 012	1 008	1 006	972
1 250	983	1 028	1 022	1 019	1 016	982
1 500	988	1 034	1 028	1 024	1 021	987
1 750	988	1 034	1 028	1 024	1 021	987
2 000	993	1 039	1 033	1 029	1 026	992
2 250	1 043	1 091	1 085	1 081	1 078	1 042
2 500	1 110	1 161	1 154	1 150	1 147	1 109
2 750	1 170	1 224	1 217	1 212	1 209	1 169
3 000	1 238	1 295	1 288	1 283	1 279	1 237
3 250	1 293	1 353	1 345	1 340	1 336	1 292

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1961–1990.

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 22
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: MODELO PRECIPITACIÓN NUM. 2, ESCENARIO B2, 2020 A 2100
 (En milímetros)

Elevación	Precipitación (mm)					
	Promedio Histórico	2020	2030	2050	2070	2100
750	1 230	1 287	1 279	1 275	1 271	1 229
1 000	1 220	1 276	1 269	1 264	1 261	1 219
1 250	1 210	1 266	1 258	1 254	1 250	1 209
1 500	1 195	1 250	1 243	1 238	1 235	1 194
1 750	1 180	1 234	1 227	1 223	1 219	1 179
2 000	1 175	1 229	1 222	1 218	1 214	1 174
2 250	1 225	1 282	1 274	1 269	1 266	1 224
2 500	1 285	1 344	1 336	1 332	1 328	1 284
2 750	1 360	1 423	1 414	1 409	1 406	1 359
3 000	1 420	1 486	1 477	1 472	1 468	1 419
3 250	1 475	1 543	1 534	1 529	1 524	1 474

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1961–1990.

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 23
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: MODELO DE PRECIPITACIÓN NUM. 1, ESCENARIO A2, 2020 A 2100
 (En milímetros)

Elevación	Precipitación (mm)					
	Promedio Histórico	2020	2030	2050	2070	2100
750	958	877	827	813	717	660
1 000	973	891	839	826	729	671
1 250	983	899	848	834	736	677
1 500	988	904	853	839	739	681
1 750	988	904	853	839	739	681
2 000	993	909	857	843	743	684
2 250	1 043	955	900	885	781	719
2 500	1 110	1 016	958	942	831	765
2 750	1 170	1 071	1 009	993	876	806
3 000	1 238	1 133	1 068	1 051	927	853
3 250	1 293	1 183	1 116	1 097	968	891

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1961–1990.

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 24
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: MODELO DE PRECIPITACIÓN NUM. 2, ESCENARIO A2, 2020 A 2100
 (En milímetros)

Elevación	Precipitación (mm)					
	Promedio Histórico	2020	2030	2050	2070	2100
750	1 230	1 126	1 061	1 044	921	848
1 000	1 220	1 117	1 053	1 035	913	841
1 250	1 210	1 107	1 044	1 027	906	834
1 500	1 195	1 094	1 031	1 014	895	824
1 750	1 180	1 080	1 018	1 002	884	813
2 000	1 175	1 075	1 014	997	879	809
2 250	1 225	1 121	1 057	1 039	917	844
2 500	1 285	1 176	1 109	1 091	962	886
2 750	1 360	1 245	1 174	1 154	1 018	937
3 000	1 420	1 299	1 225	1 205	1 063	979
3 250	1 475	1 350	1 273	1 252	1 104	1 016

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1961–1990.

Fuente: Elaboración propia.

Los modelos de temperatura que resultan de aplicar las anomalías al modelo original se muestran en el cuadro 25 para ambos escenarios. Como se puede apreciar, los niveles de temperatura constante derivados de las tendencias de los escenarios de cambio climático crecen con el tiempo. Hay además un componente variable de temperatura, asociado a la altitud. A mayores niveles de elevación, menores temperaturas en ambos escenarios, de acuerdo con la relación mostrada en el gráfico 2: por cada metro adicional de altitud, la temperatura disminuye en 0,006 °C. Las temperaturas son más elevadas en A2 que en B2.

CUADRO 25
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: MODELO DE TEMPERATURA, ESCENARIOS B2 Y A2, 2020 A 2100
 (En grados Centígrados)

Período	Modelo de Temperatura (°C)	
	B2	A2
Histórico	$T = 31,03 - 0,006 * H$	$T = 31,03 - 0,006 * H$
2020	$T = 31,80 - 0,006 * H$	$T = 31,84 - 0,006 * H$
2030	$T = 32,17 - 0,006 * H$	$T = 32,13 - 0,006 * H$
2050	$T = 32,53 - 0,006 * H$	$T = 33,08 - 0,006 * H$
2070	$T = 33,40 - 0,006 * H$	$T = 34,37 - 0,006 * H$
2100	$T = 34,09 - 0,006 * H$	$T = 35,92 - 0,006 * H$

Nota: H = Altura sobre el nivel del mar (metros).

Período histórico de referencia, promedio 1961–1990.

Fuente: Elaboración propia.

Los modelos meteorológicos desarrollados de acuerdo con los escenarios se aplicaron al modelo de la cuenca para obtener los caudales de cada año futuro. Los caudales se distribuyeron de acuerdo con la distribución promedio del sitio de la planta hidroeléctrica. Los caudales anuales obtenidos se muestran en el cuadro 26 para ambos escenarios. En general se observa una disminución del caudal anual medio para el período 2020 a 2100 respecto al promedio histórico. La mayor disminución se espera en el escenario A2, la cual terminaría en un caudal anual promedio de 9,22 m³/s para el corte 2100. En el escenario B2 se tendrían 39,79 m³/s. Es decir, la disminución del caudal en A2 sería aproximadamente tres veces mayor. Igual que la precipitación, el caudal aumenta inicialmente en B2 y su impacto es menor hasta las últimas décadas del siglo. En A2 la reducción es notable desde las primeras décadas.

CUADRO 26
CUENCA DEL RÍO CHIXOY: RESULTADOS DE SIMULACIONES DE ESCENARIOS B2 Y A2, 2020 A 2100
 (En metros cúbicos por segundo)

Período	Caudal Medio Anual (m ³ /s)	
	B2	A2
Histórico	54,99	54,99
2020	57,00	40,70
2030	54,18	33,82
2050	51,79	28,76
2070	46,92	16,39
2100	39,79	9,22

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1961–1990.

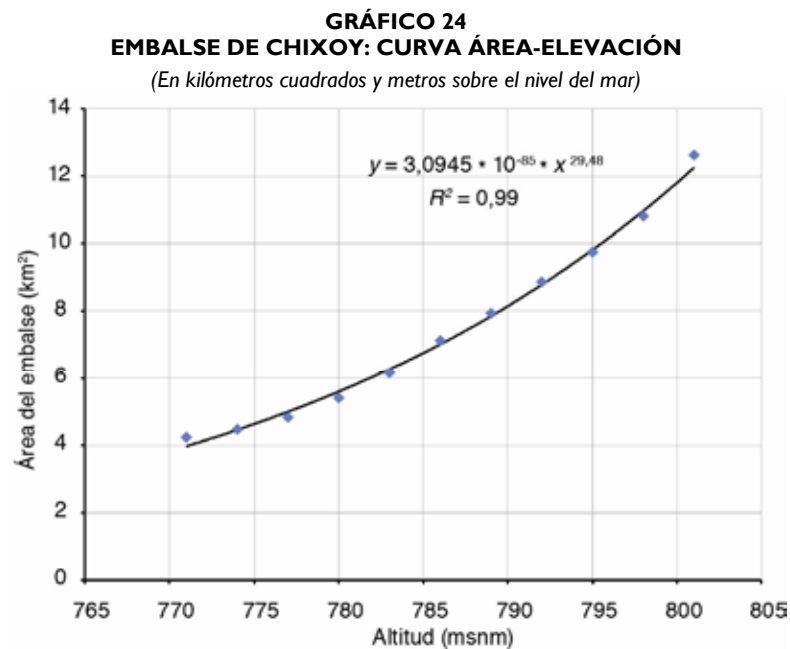
Fuente: Elaboración propia.

SIMULACIÓN DE LA OPERACIÓN DE LA PLANTA

Para simular la operación de la planta con los resultados de la simulación hidrológica de los escenarios de cambio climático, se adoptaron algunas reglas de operación que, en lo posible, se asemejan a las reglas reales de operación de la planta, las cuales se describen a continuación:

1. La cota mínima de operación es 772 msnm. La operación de la planta empieza con esta cota al inicio de la época de lluvias en junio.
2. La operación de la planta finaliza con la época de estiaje a la cota mínima de operación.
3. Se trata de llenar el embalse al final de la época de caudales altos en octubre a la cota de 803 msnm.
4. Se trata de reducir los vertidos al mínimo.
5. El caudal turbinado máximo es de 75 m³/s.

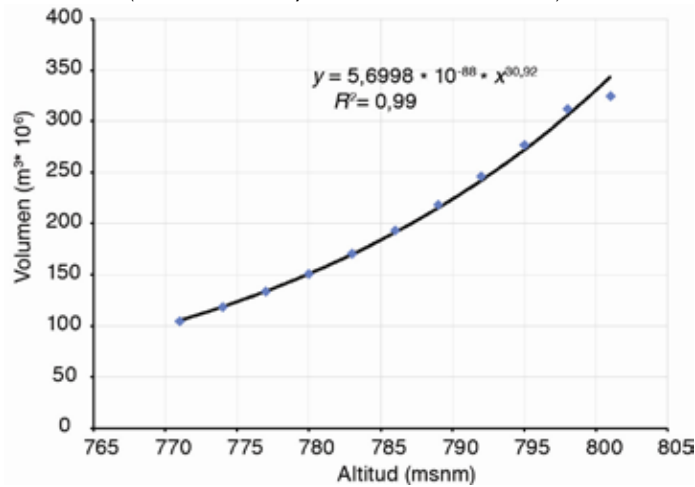
Para facilitar la simulación de la producción de la planta se adoptaron funciones que representan las curvas de área-elevación y volumen-elevación. Las curvas se muestran en los gráficos 24 y 25.



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 25
EMBALSE DE CHIXOY: CURVA VOLUMEN-ELEVACIÓN

(En metros cúbicos y metros sobre el nivel del mar)



Fuente: Elaboración propia.

Las pérdidas por evaporación se calcularon promediando la evaporación con las temperaturas correspondientes a las elevaciones 772 y 803 msnm. El cálculo de la evaporación promedio se incluye en el cuadro 27. En general se aprecian niveles de pérdidas por evaporación ligeramente más elevados en el escenario A2 que en B2.

CUADRO 27
EMBALSE DE CHIXOY: PÉRDIDAS POR EVAPORACIÓN, ESCENARIOS B2 Y A2, 2020 A 2100

(En milímetros)

Período	Evaporación (mm)	
	B2	A2
Histórico	97,3	97,3
2020	102,8	103,1
2030	105,5	105,2
2050	108,2	112,3
2070	114,8	122,3
2100	120,2	134,9

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1961–1990.

Fuente: Elaboración propia.

La producción promedio de la planta durante el período 1986-2004 es alrededor de 1.400.000 MW-h. La diferencia entre la producción calculada en el cuadro 9 y la producción promedio de la planta (véase cuadro 28) se debe a que la operación de la planta prioriza el llenado del embalse para usarlo durante el período seco, lo cual garantiza mayores derrames al final de la época de lluvias. Los resultados de las simulaciones de generación de energía para el escenario B2 se incluyen en los cuadros 29 a 33, y los del escenario A2 se incluyen en los cuadros 34 a 38.

CUADRO 28
PLANTA CHIXOY: GENERACIÓN DE ENERGÍA, 1979-2008

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Período	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)	Caudal (m ³ /s)			Turb.	Vert.	Volumen (m ³ *10 ⁶)		Energía (GW-h)	
			Ingr.	Evap.	Inicial			Embalse	Final		
Junio	772	4,15	83,56	0,16	75,00			109,90	21,80	131,69	209
Julio	776	4,93	77,01	0,18	75,00			131,81	4,90	136,71	209
Agosto	777	5,11	81,22	0,19	75,00			136,81	16,17	152,98	209
Septiembre	780	5,68	138,70	0,21	75,00			153,05	164,57	317,62	209
Octubre	799	11,38	107,37	0,41	75,00		11,42	317,06	55,03	372,08	209
Noviembre	803	13,23	49,48	0,50	48,67			371,25	0,83	372,08	136
Diciembre	803	13,23	30,23	0,48	36,92			371,24	-19,20	352,04	104
Enero	801	12,55	22,43	0,46	36,92			351,31	-38,82	312,49	104
Febrero	798	11,21	17,75	0,45	36,92			311,95	-46,39	265,56	104
Marzo	794	9,60	14,57	0,35	36,92			265,24	-59,87	205,36	104
Abril	788	7,52	14,29	0,28	36,92			205,27	-58,66	146,61	104
Mayo	779	5,46	23,32	0,20	36,92			146,69	-36,95	109,74	104
Anual			54,99	0,32	53,77						1 805

Nota: La Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 29
PLANTA CHIXOY: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO B2, 2020

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Período	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)	Caudal (m ³ /s)			Turb.	Vert.	Volumen (m ³ *10 ⁶)		Energía (GW-h)	
			Ingr.	Evap.	Inicial			Embalse	Final		
Junio	772	4,15	86,61	0,16	73,24			109,90	34,24	144,14	204
Julio	779	5,37	79,82	0,21	73,24			144,23	17,07	161,29	204
Agosto	782	5,98	84,18	0,23	73,24			161,34	28,70	190,04	204
Septiembre	786	6,99	143,76	0,28	73,24			190,00	182,08	372,08	204
Octubre	803	13,23	111,29	0,51	73,24			371,25	100,56	471,80	204
Noviembre	809	16,58	51,29	0,66	44,73			470,41	15,29	485,70	125
Diciembre	810	17,05	31,33	0,65	44,73			484,22	-37,64	446,58	125
Enero	808	15,74	23,24	0,60	44,73			445,34	-57,55	387,79	125
Febrero	804	13,76	18,39	0,58	44,73			386,87	-63,72	323,15	125
Marzo	799	11,57	15,10	0,44	44,73			322,56	-79,37	243,19	125
Abril	792	8,83	14,81	0,35	44,73			242,95	-77,55	165,40	125
Mayo	782	6,12	24,17	0,24	44,73			165,43	-55,69	109,74	125
Anual			57,00	0,41							1 899

Nota: La Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 30
PLANTA CHIXOY: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO B2, 2030

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Período	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)	Caudal (m ³ /s)			Volumen (m ³ *10 ⁶)			Energía (GW-h)	
			Ingr.	Evap.	Turb.	Vert.	Inicial	Embalse		Final
Junio	772	4,15	82,33	0,17	68,36		109,90	35,76	145,66	191
Julio	779	5,43	75,87	0,21	68,36		145,75	19,53	165,28	191
Agosto	782	6,12	80,02	0,24	68,36		165,31	30,58	195,89	191
Septiembre	787	7,19	136,65	0,29	68,36		195,83	176,25	372,08	191
Octubre	803	13,23	105,79	0,52	68,36		371,25	98,84	470,09	191
Noviembre	809	16,52	48,75	0,67	43,38		468,70	12,19	480,89	122
Diciembre	810	16,88	29,79	0,67	43,38		479,44	-38,19	441,25	122
Enero	807	15,56	22,10	0,61	43,38		440,03	-57,01	383,02	122
Febrero	804	13,60	17,48	0,59	43,38		382,13	-62,65	319,48	122
Marzo	799	11,45	14,35	0,45	43,38		318,91	-77,75	241,17	122
Abril	792	8,76	14,08	0,36	43,38		240,94	-75,95	164,99	122
Mayo	782	6,11	22,98	0,24	43,38		165,03	-55,29	109,74	122
Anual			54,18	0,42						1 806

Nota: La Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 31
PLANTA CHIXOY: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO B2, 2050

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, Gigawatts-hora)

Período	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)	Caudal (m ³ /s)			Volumen (m ³ *10 ⁶)			Energía (GW-h)	
			Ingr.	Evap.	Turb.	Vert.	Inicial	Embalse		Final
Junio	772	4,15	78,69	0,17	64,23		109,90	37,06	146,95	179
Julio	779	5,47	72,52	0,22	64,23		147,04	21,63	168,66	179
Agosto	783	6,24	76,49	0,25	64,23		168,69	32,17	200,86	179
Septiembre	787	7,36	130,62	0,31	64,23		200,78	171,30	372,08	179
Octubre	803	13,23	101,12	0,53	64,23		371,25	97,38	468,62	179
Noviembre	809	16,48	46,60	0,69	42,23		467,25	9,55	476,79	118
Diciembre	809	16,75	28,47	0,68	42,23		475,37	-38,67	436,70	118
Enero	807	15,41	21,12	0,62	42,23		435,51	-56,54	378,97	118
Febrero	803	13,46	16,71	0,60	42,23		378,10	-61,73	316,37	118
Marzo	799	11,34	13,72	0,46	42,23		315,81	-76,37	239,44	118
Abril	792	8,70	13,46	0,36	42,23		239,23	-74,58	164,65	118
Mayo	782	6,10	21,96	0,25	42,23		164,68	-54,94	109,74	118
Anual			51,79	0,43						1 727

Nota: La Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 32
PLANTA CHIXOY: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO B2, 2070

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Período	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)	Caudal (m ³ /s)			Volumen (m ³ *10 ⁶)		Energía (GW-h)		
			Ingr.	Evap.	Turb.	Vert.	Inicial		Embalse Final	
Junio	772	4,15	71,30	0,18	55,80		109,90	39,69	149,59	156
Julio	780	5,56	65,70	0,24	55,80		149,67	25,89	175,55	156
Agosto	784	6,48	69,30	0,28	55,80		175,56	35,41	210,97	156
Septiembre	788	7,72	118,34	0,34	55,80		210,85	161,23	372,08	156
Octubre	803	13,23	91,61	0,57	55,80		371,25	94,40	465,65	156
Noviembre	809	16,38	42,22	0,73	39,89		464,29	4,16	468,45	112
Diciembre	809	16,47	25,79	0,71	39,89		467,08	-39,64	427,43	112
Enero	807	15,10	19,13	0,65	39,89		426,30	-55,59	370,71	112
Febrero	803	13,18	15,14	0,63	39,89		369,88	-59,87	310,01	112
Marzo	798	11,12	12,43	0,48	39,89		309,49	-73,55	235,94	112
Abril	791	8,58	12,19	0,38	39,89		235,73	-71,79	163,94	112
Mayo	782	6,07	19,90	0,26	39,89		163,98	-54,24	109,74	112
Anual			46,90	0,45						1 565

Nota: La Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 33
PLANTA CHIXOY: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO B2, 2100

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Período	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)	Caudal (m ³ /s)			Volumen (m ³ *10 ⁶)		Energía (GW-h)		
			Ingr.	Evap.	Turb.	Vert.	Inicial		Embalse Final	
Junio	772	4,15	60,47	0,19	43,47		109,90	43,55	153,45	122
Julio	780	5,70	55,72	0,26	43,47		153,51	32,13	185,64	122
Agosto	785	6,83	58,77	0,31	43,47		185,61	40,16	225,77	122
Septiembre	790	8,23	100,37	0,38	43,47		225,60	146,48	372,08	122
Octubre	803	13,23	77,69	0,59	43,47		371,25	90,07	461,32	122
Noviembre	809	16,23	35,81	0,75	36,47		459,99	-3,67	456,31	103
Diciembre	808	16,06	21,88	0,72	36,47		455,01	-41,02	413,99	103
Enero	806	14,64	16,23	0,66	36,47		412,92	-54,22	358,70	103
Febrero	802	12,78	12,84	0,63	36,47		357,94	-57,17	300,77	103
Marzo	798	10,81	10,54	0,48	36,47		300,29	-69,45	230,83	103
Abril	791	8,40	10,34	0,39	36,47		230,65	-67,73	162,91	103
Mayo	782	6,03	16,88	0,27	36,47		162,95	-53,21	109,74	103
Anual			39,79	0,47						1 329

Nota: La Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 34
PLANTA CHIXOY: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO A2, 2020

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Período	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)	Caudal (m ³ /s)			Volumen (m ³ *10 ⁶)			Energía (GW-h)	
			Ingr.	Evap.	Turb.	Vert.	Inicial	Embalse		Final
Junio	772	4,15	61,84	0,16	45,07		109,90	43,03	152,93	126
Julio	780	5,68	56,99	0,22	45,07		152,99	31,33	184,32	126
Agosto	785	6,79	60,11	0,26	45,07		184,30	39,56	223,86	126
Septiembre	790	8,16	102,65	0,32	45,07		223,70	148,39	372,09	126
Octubre	803	13,23	79,46	0,51	45,07	0,00	371,25	90,73	461,99	126
Noviembre	809	16,25	36,62	0,65	36,95		460,65	-2,52	458,13	104
Diciembre	808	16,12	22,37	0,62	36,95		456,81	-40,69	416,12	104
Enero	806	14,72	16,60	0,57	36,95		415,05	-54,50	360,54	104
Febrero	802	12,84	13,13	0,55	36,95		359,77	-57,61	302,16	104
Marzo	798	10,86	10,78	0,42	36,95		301,67	-70,08	231,59	104
Abril	791	8,43	10,57	0,34	36,95		231,40	-68,35	163,05	104
Mayo	782	6,04	17,26	0,23	36,95		163,09	-53,35	109,74	104
Anual			40,70	0,40						1 359

Nota: La Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 35
PLANTA CHIXOY: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO A2, 2030

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Período	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)	Caudal (m ³ /s)			Volumen (m ³ *10 ⁶)			Energía (GW-h)	
			Ingr.	Evap.	Turb.	Vert.	Inicial	Embalse		Final
Junio	772	4,15	51,39	0,17	33,18		109,90	46,75	156,64	93
Julio	781	5,81	47,35	0,23	33,18		156,70	37,35	194,05	93
Agosto	786	7,13	49,95	0,28	33,18		193,99	44,15	238,14	93
Septiembre	792	8,66	85,29	0,35	33,18		237,92	134,16	372,08	93
Octubre	803	13,23	66,03	0,52	33,18	0,00	371,25	86,58	457,83	93
Noviembre	808	16,11	30,43	0,65	33,65		456,51	-10,05	446,46	95
Diciembre	808	15,73	18,59	0,62	33,65		445,21	-42,00	403,21	95
Enero	805	14,28	13,79	0,56	33,65		402,21	-53,20	349,01	95
Febrero	801	12,45	10,91	0,54	33,65		348,29	-55,02	293,27	95
Marzo	797	10,55	8,96	0,41	33,65		292,83	-66,15	226,68	95
Abril	790	8,26	8,79	0,34	33,65		226,51	-64,45	162,05	95
Mayo	782	6,00	14,34	0,24	33,65		162,10	-52,36	109,74	95
Anual			33,82	0,41						1 130

Nota: La Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 36
PLANTA CHIXOY: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO A2, 2050

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Periodo	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)	Caudal (m ³ /s)		Vert.	Volumen (m ³ *10 ⁶)		Energía (GW-h)	
			Ingr.	Evap.		Inicial	Embalse Final		
Junio	772	4,15	43,70	0,18	24,43	109,90	49,49	159,39	69
Julio	781	5,91	40,27	0,25	24,43	159,44	41,78	201,22	69
Agosto	787	7,38	42,48	0,31	24,43	201,14	47,51	248,65	69
Septiembre	793	9,02	72,54	0,39	24,43	248,39	123,69	372,08	69
Octubre	803	13,23	56,15	0,56	24,43	371,25	83,49	454,74	69
Noviembre	808	16,01	25,88	0,69	31,22	453,44	-15,65	437,80	88
Diciembre	807	15,44	15,81	0,65	31,22	436,60	-43,01	393,59	88
Enero	804	13,96	11,73	0,59	31,22	392,64	-52,21	340,43	88
Febrero	801	12,16	9,28	0,56	31,22	339,76	-53,08	286,68	88
Marzo	796	10,33	7,62	0,43	31,22	286,26	-63,22	223,04	88
Abril	790	8,13	7,47	0,35	31,22	222,88	-61,56	161,32	88
Mayo	782	5,98	12,20	0,25	31,22	161,37	-51,63	109,74	88
Anual			28,76	0,43					961

Nota: La Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 37
PLANTA CHIXOY: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO A2, 2070

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Periodo	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)	Caudal (m ³ /s)		Vert.	Volumen (m ³ *10 ⁶)		Energía (GW-h)	
			Ingr.	Evap.		Inicial	Embalse Final		
Junio	772	4,15	24,90	0,20	3,02	109,90	56,21	166,10	9
Julio	782	6,15	22,94	0,28	3,02	166,13	52,62	218,75	9
Agosto	789	7,99	24,20	0,36	3,02	218,61	55,76	274,37	9
Septiembre	795	9,90	41,33	0,47	3,02	274,00	98,08	372,09	9
Octubre	803	13,23	31,99	0,60	3,02	371,25	75,98	447,24	9
Noviembre	808	15,76	14,74	0,74	25,29	445,98	-29,26	416,72	71
Diciembre	806	14,74	9,01	0,67	25,29	415,65	-45,41	370,24	71
Enero	803	13,17	6,68	0,60	25,29	369,41	-49,83	319,58	71
Febrero	799	11,45	5,29	0,58	25,29	319,01	-48,39	270,62	71
Marzo	795	9,78	4,34	0,45	25,29	270,28	-56,11	214,17	71
Abril	789	7,83	4,26	0,37	25,29	214,04	-54,51	159,53	71
Mayo	781	5,92	6,95	0,27	25,29	159,58	-49,84	109,74	71
Anual			16,39	0,47					544

Nota: La Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 38
PLANTA CHIXOY: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO A2, 2100
 (En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Período	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)	Caudal (m ³ /s)			Volumen (m ³ *10 ⁶)			Energía (GW-h)	
			Ingr.	Evap.	Turb.	Vert.	Inicial	Embalse		Final
Junio	772	4,15	14,00	0,22	0,00	0,00	109,90	35,73	145,63	0
Julio	779	5,42	12,90	0,27	0,00	0,00	145,72	33,83	179,54	0
Agosto	784	6,62	13,61	0,33	0,00	0,00	179,54	35,56	215,09	0
Septiembre	789	7,86	23,24	0,41	0,00	0,00	214,97	59,18	274,15	0
Octubre	795	9,90	17,99	0,50	0,00	0,00	273,79	46,85	320,64	0
Noviembre	799	11,49	8,29	0,60	15,35	15,35	320,06	-19,83	300,23	44
Diciembre	797	10,79	5,07	0,54	15,35	15,35	299,75	-28,99	270,76	44
Enero	795	9,78	3,76	0,49	15,35	15,35	270,41	-31,04	239,37	44
Febrero	792	8,70	2,97	0,49	15,35	15,35	239,15	-29,93	209,22	44
Marzo	788	7,65	2,44	0,39	15,35	15,35	209,12	-34,56	174,55	44
Abril	784	6,44	2,39	0,34	15,35	15,35	174,56	-33,57	140,99	44
Mayo	778	5,26	3,91	0,27	15,35	15,35	141,09	-31,34	109,74	44
Anual			9,22	0,40						305

Nota: La Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
 Fuente: Elaboración propia.

El cuadro 39 muestra la evolución de la generación de energía. En ambos escenarios la cantidad de caudal que ingresaría a la planta disminuiría respecto al nivel promedio del período 1979 a 2008 (54,99 m³/s). En el escenario B2 disminuiría 28%, mientras que en A2 disminuiría 83% al corte a 2100. Como resultado del incremento de temperatura y otros factores, los niveles de evaporación aumentarían en 47% con B2 y en 25% con A2 al corte a 2100. Los niveles de caudal turbinado mensual promedio disminuirían 27% en B2 y 83% en A2 respecto del valor promedio del período 1979 a 2008 (53,77 m³/s).

CUADRO 39
PLANTA CHIXOY: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIOS B2 Y A2, 2020 A 2100
(En Gigawatts-hora)

Año	Energía (GW-h)	
	B2	A2
Histórico	1 805	1 805
2020	1 899	1 359
2030	1 806	1 130
2050	1 727	961
2070	1 565	544
2100	1 328	305

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1979–2008.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que, considerando los efectos del cambio climático en la generación de energía de la planta del río Chixoy en Guatemala, la generación disminuiría 26% en el escenario B2 y 83% en A2 respecto al promedio del período 1979–2008, lo que representa una pérdida de 477 y 1.499 GW-h, respectivamente.

SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO LEMPA

SIMULACIÓN HIDROLÓGICA

Para calcular el efecto del cambio climático en la producción de energía se usaron los escenarios B2 y A2, recomendados por el CCA de la UNAM. En cada escenario se utilizó el promedio de los resultados de tres modelos de clima: HADCM3, GFDL R30 y ECHAM4 para B2 y HADGEM1, GFDL CM2.0 y ECHAM4 para A2. Las anomalías se calcularon con el promedio de aquellas de los departamentos que geográficamente son parte de las cuencas.

En el cuadro 40 se muestra el promedio de las anomalías de la precipitación acumulada para los Departamentos de Chiquimula, Jalapa, Jutiapa y Santa Rosa en Guatemala; Chalatenango, Cuscatlán, La Libertad, San Salvador, Santa Ana y Sonsonate en El Salvador, y La Paz, Intibucá, Lempira y Ocotepeque en Honduras, todos ellos en la cuenca del río Lempa. En el cuadro 41 se incluyen las anomalías en °C.

En el escenario B2, la precipitación aumenta y se mantiene aproximadamente en 4% sobre el nivel histórico, mientras que en el escenario A2 se prevé una progresiva reducción hasta aproximadamente 30% del nivel histórico. Con respecto a la temperatura, ambos escenarios arrojan aumentos: 3 °C en B2 y hasta casi 5 °C en A2 hacia finales del siglo.

CUADRO 40
RÍO LEMPA: CAMBIOS DE PRECIPITACIÓN ACUMULADA PARA DEPARTAMENTOS
DE LA CUENCA, ESCENARIOS B2 Y A2, 2020 A 2100

(En porcentajes)

Año	Anomalía (%)	
	B2	A2
2020	4	-7
2030	4	-12
2050	2	-14
2070	4	-22
2100	-2	-31

Nota: Para calcular las anomalías se tomó el clima del año señalado respecto a la climatología 1961–1990 a partir del promedio de los modelos referidos.

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 41
RÍO LEMPA: CAMBIO DE TEMPERATURA MEDIA PARA DEPARTAMENTOS
DE LA CUENCA, ESCENARIOS B2 Y A2, 2020 A 2100

(En grados Centígrados)

Año	Anomalía (°C)	
	Escenario B2	Escenario A2
2020	0,74	0,89
2030	1,17	1,16
2050	1,53	2,15
2070	2,29	3,33
2100	3,04	4,78

Nota: Para calcular las anomalías se tomó el clima del año señalado respecto a la climatología 1961–1990 a partir del promedio de los modelos referidos.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de los parámetros de precipitación y temperatura obtenidos para los escenarios, se aplicaron a los resultados de precipitación y temperatura obtenidos del modelo hidrológico. Los tres modelos de precipitación resultantes se incluyen en los cuadros 42 a 44 para el escenario menos pesimista (B2) y 45 a 47 para el escenario más pesimista (A2).

El ciclo de precipitación en la cuenca del río Lempa es más complejo que el de la cuenca del río Chixoy. El escenario (B2) prevé que la precipitación disminuya en altitudes menores a 1.000 msnm; a partir de este nivel tiende a aumentar. Los tres modelos de precipitación muestran igual comportamiento, aunque con distintos niveles de precipitación. En el escenario A2 muestra un comportamiento similar al del escenario B2, pero resultan en niveles de precipitación menores. En ambos escenarios los niveles de precipitación disminuyen con el tiempo, más en A2, aunque la relación elevación–precipitación se mantiene a lo largo del tiempo.

CUADRO 42
CUENCA DEL RÍO LEMPA: MODELO DE PRECIPITACIÓN NUM. 1, ESCENARIO B2, 2020 A 2100
 (En milímetros)

Elevación	Precipitación (mm)					
	Histórico	2020	2030	2050	2070	2100
0	2 250	2 339	2 338	2 293	2 339	2 205
250	1 750	1 819	1 818	1 784	1 819	1 715
500	1 350	1 404	1 403	1 376	1 403	1 323
750	1 200	1 248	1 247	1 223	1 247	1 176
1 000	1 150	1 196	1 195	1 172	1 195	1 127
1 250	1 215	1 263	1 262	1 238	1 263	1 190
1 500	1 290	1 341	1 340	1 315	1 341	1 264
1 750	1 440	1 497	1 496	1 468	1 496	1 411
2 000	1 600	1 664	1 662	1 631	1 663	1 568
2 250	1 800	1 872	1 870	1 835	1 871	1 764

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1961–1990.

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 43
CUENCA DEL RÍO LEMPA: MODELO DE PRECIPITACIÓN NUM. 2, ESCENARIO B2, 2020 A 2100
 (En milímetros)

Elevación	Precipitación (mm)					
	Histórico	2020	2030	2050	2070	2100
0	2 250	2 339	2 338	2 293	2 338	2 205
250	1 900	1 976	1 974	1 937	1 974	1 862
500	1 650	1 716	1 714	1 682	1 715	1 617
750	1 500	1 559	1 558	1 529	1 559	1 469
1 000	1 450	1 508	1 507	1 478	1 507	1 421
1 250	1 500	1 559	1 558	1 529	1 559	1 469
1 500	1 560	1 622	1 621	1 590	1 621	1 529
1 750	1 700	1 768	1 766	1 732	1 767	1 666
2 000	1 850	1 924	1 922	1 886	1 923	1 813
2 250	2 000	2 079	2 078	2 038	2 078	1 959

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1961–1990.

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 44
CUENCA DEL RÍO LEMPA: MODELO DE PRECIPITACIÓN NUM 3, ESCENARIO B2, 2020 A 2100
 (En milímetros)

Elevación	Precipitación (mm)					
	Histórico	2020	2030	2050	2070	2100
0	2 250	2 339	2 338	2 293	2 338	2 205
250	2 020	2 101	2 099	2 059	2 099	1 979
500	1 850	1 924	1 922	1 886	1 923	1 813
750	1 750	1 819	1 818	1 784	1 819	1 715
1 000	1 700	1 768	1 766	1 733	1 767	1 666
1 250	1 710	1 778	1 777	1 743	1 777	1 675
1 500	1 740	1 809	1 808	1 774	1 808	1 705
1 750	1 820	1 892	1 891	1 855	1 891	1 783
2 000	1 910	1 986	1 985	1 947	1 985	1 871
2 250	2 000	2 079	2 078	2 038	2 078	1 959

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1961 – 1990.

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 45
CUENCA DEL RÍO LEMPA: MODELO DE PRECIPITACIÓN NUM. 1, ESCENARIO A2, 2020 A 2100
 (En milímetros)

Elevación	Precipitación (mm)					
	Histórico	2020	2030	2050	2070	2100
0	2 250	2 101	1 975	1 931	1 749	1 563
250	1 750	1 634	1 536	1 502	1 360	1 215
500	1 350	1 261	1 185	1 158	1 049	938
750	1 200	1 120	1 053	1 029	933	833
1 000	1 150	1 074	1 009	987	894	799
1 250	1 215	1 134	1 067	1 043	944	844
1 500	1 290	1 205	1 133	1 107	1 003	896
1 750	1 440	1 345	1 264	1 236	1 119	1 000
2 000	1 600	1 494	1 405	1 373	1 244	1 111
2 250	1 800	1 681	1 580	1 545	1 399	1 250

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1961–1990.

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 46
CUENCA DEL RÍO LEMPA: MODELO DE PRECIPITACIÓN NUM. 2, ESCENARIO A2, 2020 A 2100
 (En milímetros)

Elevación	Precipitación (mm)					
	Histórico	2020	2030	2050	2070	2100
0	2 250	2 101	1 975	1 931	1 749	1 563
250	1 900	1 774	1 668	1 630	1 477	1 319
500	1 650	1 541	1 449	1 416	1 282	1 146
750	1 500	1 401	1 316	1 287	1 166	1 042
1000	1 450	1 354	1 273	1 244	1 127	1 007
1250	1 500	1 401	1 317	1 287	1 166	1 042
1500	1 560	1 457	1 369	1 339	1 213	1 083
1750	1 700	1 587	1 492	1 459	1 321	1 181
2000	1 850	1 727	1 624	1 588	1 438	1 285
2250	2 000	1 867	1 756	1 716	1 555	1 389

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1961–1990.

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 47
CUENCA DEL RÍO LEMPA: MODELO DE PRECIPITACIÓN NUM. 3, ESCENARIO A2, 2020 A 2100
 (En milímetros)

Elevación	Precipitación (mm)					
	Histórico	2020	2030	2050	2070	2100
0	2 250	2 101	1 975	1 931	1 749	1 563
250	2 020	1 886	1 773	1 733	1 570	1 403
500	1 850	1 727	1 624	1 588	1 438	1 285
750	1 750	1 634	1 536	1 502	1 360	1 215
1 000	1 700	1 587	1 492	1 459	1 321	1 181
1 250	1 710	1 597	1 501	1 467	1 329	1 188
1 500	1 740	1 625	1 528	1 493	1 352	1 208
1 750	1 820	1 699	1 598	1 562	1 415	1 264
2 000	1 910	1 783	1 677	1 639	1 485	1 326
2 250	2 000	1 867	1 756	1 716	1 556	1 389

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1961–1990.

Fuente: Elaboración propia.

Los modelos de temperatura que resultan de aplicar las anomalías en el modelo original de temperatura se muestran en el cuadro 48 para los escenarios B2 y A2. Como se puede apreciar, a niveles de elevación más altos corresponden temperaturas más bajas en ambos escenarios. En general, las temperaturas son más elevadas en A2 que en B2.

CUADRO 48
CUENCA DEL RÍO LEMPA: MODELO DE TEMPERATURA, ESCENARIOS B2 Y A2, 2020 A 2100
(En grados Centígrados)

Período	Modelos de Temperatura (°C)	
	B2	A2
Histórico	$T = 28,38 - 0,006 * H$	$T = 28,38 - 0,006 * H$
2020	$T = 28,59 - 0,006 * H$	$T = 28,63 - 0,006 * H$
2030	$T = 28,71 - 0,006 * H$	$T = 28,71 - 0,006 * H$
2050	$T = 28,81 - 0,006 * H$	$T = 28,99 - 0,006 * H$
2070	$T = 29,03 - 0,006 * H$	$T = 29,33 - 0,006 * H$
2100	$T = 29,24 - 0,006 * H$	$T = 29,74 - 0,006 * H$

Nota: H = altura sobre el nivel del mar (metros).

Período histórico de referencia, promedio 1961–1990.

Fuente: Elaboración propia.

Los modelos meteorológicos se aplicaron al modelo de la cuenca para obtener los caudales de cada año simulado. Los caudales se distribuyeron según la distribución promedio observada en el sitio de la presa de la planta hidroeléctrica. Los caudales anuales obtenidos en los escenarios B2 y A2 se muestran en el cuadro 49. En el escenario B2 el aumento del caudal sería menor en las primeras décadas, seguido por una reducción que llegaría a 15% en el corte a 2100 en relación con el nivel histórico. En A2 disminuye tan pronto como al corte 2020. Así, en el escenario A2 se estima un caudal anual promedio de 32,7 m³/s para el corte a 2100, mientras que en B2 se tendrían 91,5 m³/s. Es decir, la disminución del caudal en A2 sería aproximadamente cinco veces mayor que la de B2.

CUADRO 49
CUENCA DEL RÍO LEMPA: RESULTADOS DE SIMULACIONES DE ESCENARIOS B2 Y A2, 2020 A 2100
(En metros cúbicos por segundo)

Período	Caudal Medio Anual (m ³ /s)	
	B2	A2
Histórico	107,9	107,9
2020	112,8	86,5
2030	111,3	73,3
2050	105,3	66,8
2070	108,0	48,7
2100	91,5	32,7

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1961–1990.

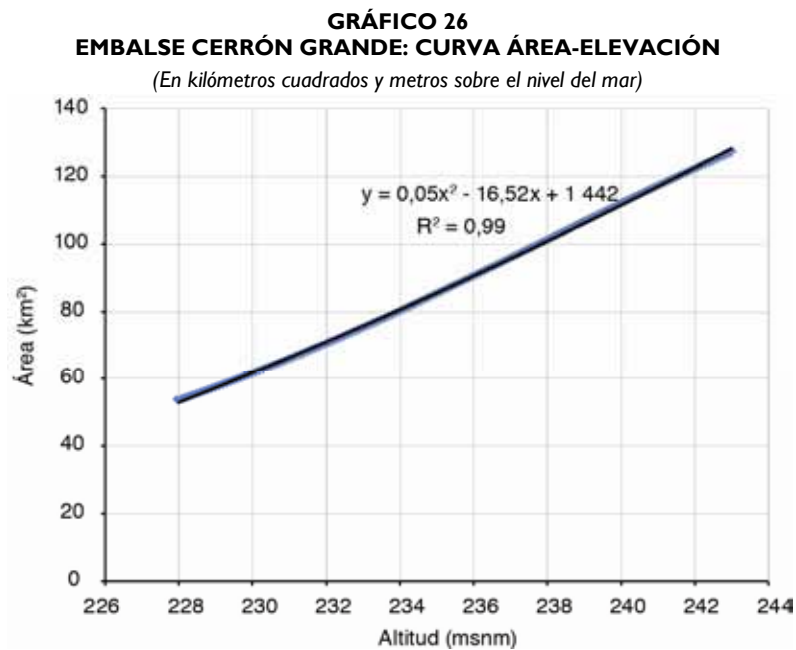
Fuente: elaboración propia.

SIMULACIÓN DE LA OPERACIÓN DE LA PLANTA

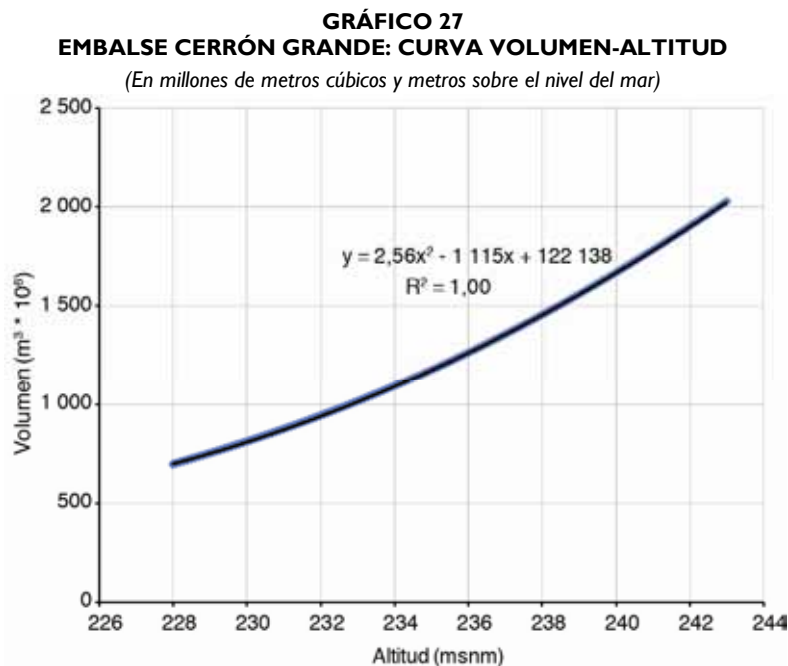
Para simular la operación de la planta con los resultados de la simulación hidrológica de los escenarios de cambio climático se adoptaron reglas de operación similares a las de la planta. Las reglas adoptadas se describen a continuación:

6. La cota mínima de operación es 228 msnm. La operación de la planta empieza con esta cota al inicio de la temporada de lluvias en junio.
7. La planta opera a la cota mínima al fin de la temporada de estiaje.
8. Se trata de llenar el embalse a la cota de 243 msnm al final de la temporada de caudales altos en octubre. Se trata de reducir los vertidos al mínimo.
9. El caudal turbinado máximo es de 175 m³/s por turbina, es decir, un total de 350 m³/s.

Para facilitar la simulación de la producción de la planta se adoptaron funciones que representan las curvas de área-elevación y volumen-elevación. Las curvas se muestran en los gráficos 26 y 27.



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Las pérdidas por evaporación se calcularon con la ecuación que se incluye en el gráfico 10. La evaporación en el embalse se calculó promediando las elevaciones 243 msnm y 235 msnm, que son las de operación máxima y mínima, respectivamente, y calculando la evaporación de la elevación promedio. La evaporación se redujo en 30% debido a que los datos disponibles corresponden a los de los tanques evaporímetros. La evaporación de superficies libres como lagos y embalses es menor que la de los tanques evaporímetros por el efecto de la convección sobre la superficie de agua. Para calcular la evaporación en los escenarios de cambio climático se calculó una elevación equivalente a la temperatura del período y la evaporación correspondiente. El cálculo de la evaporación para los escenarios B2 y A2 se incluye en el cuadro 50, observando aumentos de pérdidas en ambos casos, pero mayor en A2.

CUADRO 50
EMBALSE CERRÓN GRANDE: PÉRDIDAS POR EVAPORACIÓN, ESCENARIOS B2 Y A2, 2020 A 2100
(En milímetros)

Período	Evaporación (mm)	
	B2	A2
Histórico	119,1	119,1
2020	121,3	121,8
2030	122,8	122,8
2050	124,2	127,1
2070	127,8	135,2
2100	132,5	164,7

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1961–1990.

Fuente: Elaboración propia.

La producción promedio de la planta durante el período 1999 a 2009 fue aproximadamente 454 GW-h. La diferencia entre la producción calculada en el cuadro 16 y la producción promedio de la planta (véase cuadro 51) se debe a que la curva que relaciona el caudal turbinado con la energía mensual produce menores cantidades para caudales altos (superiores a 150 m³/s), como puede observarse en el gráfico 11. Los resultados de la simulación de generación de energía del escenario B2 se incluyen en los cuadros 52 a 56 y los del escenario A2 se incluyen en los cuadros 57 a 61.

CUADRO 51
PLANTA CERRÓN GRANDE: GENERACIÓN DE ENERGÍA, 1984-2009

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Periodo	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)		Caudal (m ³ /s)		Turb.	Vert.	Volumen (m ³ *10 ⁶)		Energía (GW-h)	
		Ingr.	Evap.	Ingr.	Evap.			Inicial	Embalse		Final
Junio	228	51,3	153,55	2,28	119,27			694,3	85,71	780,0	42
Julio	229	58,2	199,29	2,68	119,27			780,0	200,48	980,5	42
Agosto	232	71,4	217,88	3,18	119,27			980,5	255,61	1 236,1	42
Septiembre	236	87,2	340,89	3,88	119,27			1 236,1	583,19	1 819,3	42
Octubre	241	117,1	219,16	5,38	119,27			1 819,3	244,96	2 064,2	42
Noviembre	243	126,4	53,66	5,62	94,73			2 064,2	-125,05	1 939,2	33
Diciembre	242	121,9	22,68	5,60	94,73			1 939,2	-201,28	1 737,9	33
Enero	241	113,5	14,98	5,05	94,73			1 737,9	-227,14	1 510,8	33
Febrero	239	102,5	12,14	4,56	94,73			1 510,8	-233,42	1 277,4	33
Marzo	236	89,6	8,99	4,41	94,73			1 277,4	-218,10	1 059,3	33
Abril	233	76,4	12,17	3,40	94,73			1 059,3	-230,22	829,0	33
Mayo	230	61,5	39,37	2,83	94,73			829,0	-150,81	678,2	33
Anual			107,90	4,07	104,96						443

Nota: Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 52
PLANTA CERRÓN GRANDE: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO B2, 2020

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Periodo	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)		Caudal (m ³ /s)		Turb.	Vert.	Volumen (m ³ *10 ⁶)		Energía (GW-h)	
		Ingr.	Evap.	Ingr.	Evap.			Inicial	Embalse		Final
Junio	228	51,3	160,65	2,40	129,67			697,7	74,07	771,8	46
Julio	229	57,0	208,50	2,59	129,67			767,8	204,21	972,0	46
Agosto	232	71,5	227,95	3,24	129,67			972,3	254,56	1 226,9	46
Septiembre	237	87,2	356,64	4,08	129,67			1 234,3	577,72	1 812,0	46
Octubre	241	116,2	229,29	5,27	129,67			1 803,8	252,71	2 056,5	46
Noviembre	243	126,4	56,14	5,92	94,82			2 025,4	-115,57	1 909,8	33
Diciembre	242	120,4	23,73	5,46	94,82			1 893,5	-205,01	1 688,5	33
Enero	240	110,7	15,67	5,02	94,82			1 688,2	-211,98	1 476,2	33
Febrero	238	100,5	12,70	5,04	94,82			1 483,5	-198,64	1 284,9	33
Marzo	236	90,4	9,40	4,10	94,82			1 293,0	-228,76	1 064,3	33
Abril	234	77,5	12,74	3,63	94,82			1 067,6	-212,75	854,9	33
Mayo	231	63,3	41,19	2,87	94,82			851,9	-151,31	700,6	33
Anual			112,88	4,13							463

Nota: Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 53
PLANTA CERRÓN GRANDE: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO B2, 2030

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Período	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)	Caudal (m ³ /s)			Volumen (m ³ *10 ⁶)		Energía (GW-h)	
			Ingr.	Evap.	Turb.	Vert.	Inicial		Final
Junio	228	51,3	158,53	2,43	126,51	697,7	76,68	774,4	45
Julio	229	57,2	205,74	2,63	126,51	770,4	205,18	975,6	45
Agosto	232	71,7	224,94	3,29	126,51	976,0	254,81	1 230,8	45
Septiembre	236	87,4	351,92	4,14	126,51	1 238,3	573,53	1 811,8	45
Octubre	241	116,2	226,25	5,33	126,51	1 803,6	252,88	2 056,5	45
Noviembre	243	126,4	55,40	5,99	94,48	2 025,4	-116,80	1 908,6	33
Diciembre	242	120,3	23,41	5,52	94,48	1 892,4	-205,11	1 687,3	33
Enero	240	110,6	15,46	5,08	94,48	1 687,0	-211,63	1 475,4	33
Febrero	238	100,5	12,54	5,10	94,48	1 482,7	-198,23	1 284,5	33
Marzo	236	90,4	9,28	4,15	94,48	1 292,7	-228,19	1 064,5	33
Abril	234	77,5	12,57	3,67	94,48	1 067,8	-212,30	855,5	33
Mayo	231	63,4	40,65	2,91	94,48	852,5	-151,96	700,6	33
Anual			111,39	4,19					456

Nota: Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 54
PLANTA CERRÓN GRANDE: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO B2, 2050

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Período	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)	Caudal (m ³ /s)			Volumen (m ³ *10 ⁶)		Energía (GW-h)	
			Ingr.	Evap.	Turb.	Vert.	Inicial		Final
Junio	228	51,3	149,95	2,46	113,90	697,7	87,07	784,8	40
Julio	229	58,0	194,61	2,69	113,90	780,8	208,97	989,8	40
Agosto	233	72,7	212,77	3,37	113,90	990,7	255,78	1 246,5	40
Septiembre	236	88,3	332,89	4,23	113,90	1 254,2	556,65	1 810,8	40
Octubre	241	116,1	214,02	5,39	113,90	1 802,7	253,72	2 056,4	40
Noviembre	243	126,4	52,40	6,06	93,18	2 025,3	-121,38	1 903,9	33
Diciembre	242	120,1	22,15	5,57	93,18	1 888,2	-205,17	1 683,0	33
Enero	240	110,4	14,63	5,12	93,18	1 682,9	-210,40	1 472,6	33
Febrero	238	100,3	11,86	5,15	93,18	1 479,9	-196,73	1 283,2	33
Marzo	236	90,4	8,78	4,19	93,18	1 291,4	-226,06	1 065,3	33
Abril	234	77,5	11,89	3,72	93,18	1 068,7	-210,70	858,0	33
Mayo	231	63,5	38,45	2,95	93,18	855,0	-154,48	700,6	33
Anual			105,37	4,24					429

Nota: Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 55
PLANTA CERRÓN GRANDE: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO B2, 2070

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Período	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)		Caudal (m ³ /s)			Volumen (m ³ ·10 ⁶)		Energía (GW-h)
		Ingr.	Evap.	Turb.	Vert.	Inicial	Embalse	Final	
Junio	228	51,3	2,53	119,39		697,7	82,55	780,2	42
Julio	229	57,7	2,76	119,39		776,3	207,38	983,7	42
Agosto	233	72,3	3,45	119,39		984,4	255,38	1239,8	42
Septiembre	236	87,9	4,34	119,39		1 247,4	564,12	1 811,5	42
Octubre	241	116,2	5,55	119,39		1 803,3	253,19	2 056,5	42
Noviembre	243	126,4	6,23	93,69		2 025,3	-119,71	1 905,6	33
Diciembre	242	120,2	5,74	93,69		1 889,8	-205,48	1 684,3	33
Enero	240	110,5	5,28	93,69		1 684,2	-210,77	1 473,4	33
Febrero	238	100,4	5,31	93,69		1 480,8	-197,24	1 283,5	33
Marzo	236	90,4	4,32	93,69		1 291,7	-226,83	1 064,9	33
Abril	234	77,5	3,82	93,69		1 068,2	-211,24	857,0	33
Mayo	231	63,5	3,03	93,69		854,0	-153,45	700,6	33
Anual			4,36						441

Nota: Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 56
PLANTA CERRÓN GRANDE: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO B2, 2100

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Período	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)		Caudal (m ³ /s)			Volumen (m ³ ·10 ⁶)		Energía (GW-h)
		Ingr.	Evap.	Turb.	Vert.	Inicial	Embalse	Final	
Junio	228	51,3	2,53	85,02		697,7	110,89	808,6	29
Julio	229	59,9	2,86	85,02		804,8	217,69	1 022,5	29
Agosto	233	74,8	3,57	85,02		1 024,5	258,05	1 282,6	29
Septiembre	236	90,3	4,46	85,02		1 290,7	518,06	1 808,8	29
Octubre	241	116,1	5,54	85,02		1 800,8	255,68	2 056,4	29
Noviembre	243	126,4	6,23	90,21		2 025,3	-131,92	1 893,4	31
Diciembre	242	119,7	5,71	90,21		1 878,6	-205,36	1 673,2	31
Enero	240	110,0	5,25	90,21		1 673,7	-207,57	1 466,1	31
Febrero	238	100,0	5,29	90,21		1 473,6	-193,30	1 280,3	31
Marzo	236	90,2	4,31	90,21		1 288,4	-221,18	1 067,3	31
Abril	234	77,6	3,83	90,21		1 070,7	-207,04	863,6	31
Mayo	231	63,9	3,05	90,21		860,8	-160,29	700,6	31
Anual			4,39						362

Nota: Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 57
PLANTA CERRÓN GRANDE: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO A2, 2020

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Período	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)		Caudal (m ³ /s)		Vert.	Volumen (m ³ *10 ⁶)		Energía (GW-h)	
		Ingr.	Evap.	Turb.	Inicial		Embalse	Final		
Junio	228	51,3	123,17	2,41	74,68		697,7	119,42	817,1	26
Julio	230	60,5	159,85	2,75	74,68		813,4	220,75	1 034,2	26
Agosto	233	75,5	174,76	3,44	74,68		1 036,6	258,86	1 295,4	26
Septiembre	236	91,0	273,43	4,28	74,68		1 303,7	504,06	1 807,7	26
Octubre	241	116,0	175,79	5,28	74,68		1 799,8	256,67	2 056,5	26
Noviembre	243	126,4	43,04	5,94	89,25		2 025,4	-135,15	1 890,2	31
Diciembre	242	119,5	18,19	5,44	89,25		1 875,7	-204,88	1 670,8	31
Enero	240	109,9	12,01	5,00	89,25		1 671,4	-206,86	1 464,5	31
Febrero	238	99,9	9,74	5,03	89,25		1 472,1	-192,34	1 279,7	31
Marzo	236	90,2	7,21	4,10	89,25		1 287,8	-219,72	1 068,1	31
Abril	234	77,7	9,76	3,65	89,25		1 071,6	-206,01	865,6	31
Mayo	231	64,1	31,58	2,92	89,25		862,8	-162,26	700,5	31
Anual		0,8	86,55	4,19						348

Nota: Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 58
PLANTA CERRÓN GRANDE: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO A2, 2030

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Período	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)		Caudal (m ³ /s)		Vert.	Volumen (m ³ *10 ⁶)		Energía (GW-h)	
		Ingr.	Evap.	Turb.	Inicial		Embalse	Final		
Junio	228	51,3	104,31	2,43	47,00		697,7	142,25	839,9	16
Julio	230	62,2	135,38	2,85	47,00		836,6	229,08	1 065,7	16
Agosto	234	77,5	148,01	3,56	47,00		1 069,1	261,02	1 330,1	16
Septiembre	237	92,9	231,57	4,41	47,00		1 338,6	467,00	1 805,6	16
Octubre	241	115,9	148,88	5,32	47,00		1 797,8	258,63	2 056,5	16
Noviembre	243	126,4	36,46	5,99	86,43		2 025,3	-145,05	1 880,3	30
Diciembre	242	119,1	15,41	5,46	86,43		1 866,6	-204,85	1 661,8	30
Enero	239	109,5	10,17	5,02	86,43		1 662,8	-204,23	1 458,6	30
Febrero	238	99,6	8,25	5,06	86,43		1 466,2	-189,12	1 277,1	30
Marzo	236	90,0	6,11	4,13	86,43		1 285,2	-215,12	1 070,0	30
Abril	234	77,8	8,27	3,69	86,43		1 073,5	-202,58	871,0	30
Mayo	231	64,5	26,75	2,96	86,43		868,3	-167,76	700,6	30
Anual		0,8	73,30	4,24						291

Nota: Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 59
PLANTA CERRÓN GRANDE: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO A2, 2050

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Período	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)	Caudal (m ³ /s)			Vert.	Volumen (m ³ *10 ⁶)			Energía (GW-h)
			Ingr.	Evap.	Turb.		Inicial	Embalse	Final	
Junio	228	51,3	95,14	2,52	33,41		697,7	153,48	851,2	11
Julio	231	63,0	123,48	2,99	33,41		848,1	233,23	1 081,3	11
Agosto	234	78,5	135,00	3,73	33,41		1 085,2	262,11	1 347,3	11
Septiembre	237	93,8	211,21	4,60	33,41		1 355,8	448,93	1 804,7	11
Octubre	241	115,9	135,79	5,50	33,41		1 797,0	259,48	2 056,5	11
Noviembre	243	126,4	33,25	6,20	85,00		2 025,4	-150,19	1 875,2	29
Diciembre	242	118,9	14,05	5,64	85,00		1 861,9	-205,14	1 656,8	29
Enero	239	109,2	9,28	5,19	85,00		1 658,1	-202,80	1 455,3	29
Febrero	238	99,5	7,52	5,23	85,00		1 463,0	-187,42	1 275,5	29
Marzo	236	89,9	5,57	4,27	85,00		1 283,6	-212,74	1 070,9	29
Abril	234	77,9	7,54	3,82	85,00		1 074,4	-200,76	873,6	29
Mayo	231	64,7	24,40	3,07	85,00		871,1	-170,54	700,5	29
Anual		0,9	66,85	4,40					700,5	263

Nota: Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 60
PLANTA CERRÓN GRANDE: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO A2, 2070

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Período	Cota Inicial (msnm)	Área Embalse (km ²)	Caudal (m ³ /s)			Vert.	Volumen (m ³ *10 ⁶)			Energía (GW-h)
			Ingr.	Evap.	Turb.		Inicial	Embalse	Final	
Junio	228	51,3	69,37	2,68	0,00		697,7	172,87	870,6	0
Julio	231	64,4	90,04	3,25	0,00		867,9	232,43	1 100,4	0
Agosto	234	79,7	98,43	4,02	0,00		1 048,8	252,87	1 357,7	0
Septiembre	237	94,4	154,01	4,92	0,00		1 366,1	386,42	1 752,6	0
Octubre	241	113,6	99,01	5,73	0,00		1 748,4	249,83	1 998,3	0
Noviembre	242	124,0	24,24	6,47	78,48		1 973,5	-157,36	1 816,1	27
Diciembre	241	116,4	10,25	5,87	78,48		1 807,6	-198,50	1 609,1	27
Enero	239	107,0	6,77	5,40	78,48		1 612,4	-192,09	1 420,4	27
Febrero	238	97,7	5,49	5,46	78,48		1 428,5	-176,60	1 251,9	27
Marzo	236	88,6	4,06	4,47	78,48		1 259,7	-199,33	1 060,4	27
Abril	234	77,2	5,50	4,03	78,48		1 063,6	-189,17	874,4	27
Mayo	231	64,7	17,79	3,27	78,48		871,9	-171,32	700,5	27
Anual		0,7	48,75	4,63					700,5	191

Nota: Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 61
PLANTA CERRÓN GRANDE: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIO A2, 2100

(En metros sobre el nivel del mar, kilómetros cuadrados, metros cúbicos por segundo, metros cúbicos y Gigawatts-hora)

Periodo	Cota Inicial (msnm)	Area Embalse (km ²)	Caudal (m ³ /s)			Volumen (m ³ *10 ⁶)			Energía (GW-h)	
			Ingr.	Evap.	Turb.	Vert.	Inicial	Embalse		Final
Junio	228	51,3	46,62	3,26	0,00	0,00	697,7	112,38	810,1	0
Julio	229	60,0	60,50	3,69	0,00	0,00	806,3	152,17	958,5	0
Agosto	232	70,6	66,15	4,34	0,00	0,00	958,4	165,54	1 123,9	0
Septiembre	234	81,1	103,49	5,16	0,00	0,00	1 129,0	254,88	1 383,9	0
Octubre	237	95,8	66,53	5,89	0,00	0,00	1 392,3	162,43	1 554,7	0
Noviembre	239	104,4	16,29	6,64	52,94	52,94	1 560,1	-112,18	1 447,9	18
Diciembre	238	99,1	6,89	6,09	52,94	52,94	1 455,7	-139,67	1 316,0	18
Enero	237	92,2	4,55	5,67	52,94	52,94	1 324,4	-129,61	1 194,8	18
Febrero	235	85,3	3,69	5,81	52,94	52,94	1 201,6	-119,15	1 082,5	18
Marzo	234	78,6	2,73	4,83	52,94	52,94	1 086,4	-134,48	951,9	18
Abril	232	70,1	3,70	4,46	52,94	52,94	951,6	-127,63	824,0	18
Mayo	230	61,0	11,95	3,75	52,94	52,94	820,4	-119,83	700,6	18
Anual		0,6	32,76	4,97						126

Nota: Cota Inicial se refiere a la cota inicial de cada mes; Ingr. = caudal que ingresa; Evap. = Evaporación; Turb. = Turbinado; Vert. = Vertido.
Fuente: Elaboración propia.

El cuadro 62 muestra la evolución de la generación de energía en ambos escenarios. En B2 podría aumentar o alcanzar relativa estabilidad, salvo en las últimas décadas del siglo, cuando podría disminuir hasta 17% respecto al promedio histórico. En A2 la reducción es progresiva desde las primeras décadas y termina con una pérdida de 70%.

CUADRO 62
PLANTA CERRÓN GRANDE: GENERACIÓN DE ENERGÍA, ESCENARIOS B2 Y A2, 2020 A 2100
(En Gigawatts-hora)

Año	Energía (GW-h)	
	B2	A2
Histórico	443	443
2020	463	348
2030	456	291
2050	429	263
2070	441	191
2100	369	126

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1979–2008.

Fuente: Elaboración propia.

Considerando los efectos del cambio climático en la planta del río Lempa, la generación de energía disminuiría 17% en el escenario B2 y 71% en A2 respecto al promedio del período 1979–2008, lo que representa 74,5 GW-h y 317 GW-h, respectivamente.

5. CONCLUSIONES

Para facilitar la discusión de resultados se elaboraron los cuadros 63 a 66, donde se resumen los resultados de las simulaciones hidrológicas y las simulaciones de la operación de los embalses en los escenarios B2 (menos pesimista) y A2 (más pesimista). En la primera columna se identifica el periodo considerado, en la segunda se describen los escenarios de cambio climático, la tercera describe el balance hidrológico de las cuencas, la cuarta muestra los resultados del análisis de evaporación de los embalses y el porcentaje de aumento según los escenarios de cambio climático, la quinta muestra los caudales correspondientes a cada escenario de cambio climático y el porcentaje de la diferencia respecto a la situación actual, la sexta describe la energía generada y el porcentaje de la diferencia respecto a la situación actual.

DATOS BÁSICOS

La información disponible permitió el desarrollo del trabajo, lo cual muestra la preocupación de las autoridades por la planificación de la operación de las plantas. Sin embargo, algunos aspectos de la información hidrometeorológica pueden ser mejorados.

Respecto de la medición de la precipitación pueden mencionarse dos aspectos relevantes: el número de estaciones y su localización. Primero, hay muy pocas estaciones en las cuencas, lo cual dificulta identificar el patrón de variación de la lluvia a lo largo de las cuencas de grandes extensiones para el tamaño de los países. Segundo, la mayor parte de las estaciones se localizan en las partes bajas de las cuencas, por lo que es muy difícil identificar el patrón de variación de la lluvia en altitudes mayores. Para cerrar el balance de aguas, las curvas que relacionan la precipitación con la altitud se basan en el hecho de que las estaciones hidrométricas registran mayor precipitación a elevaciones mayores.

En ambos casos es importante incluir la evaporación como pérdida del embalse para calcular su balance. Aunque este parámetro representa una pequeña proporción del caudal anual medio, puede ser importante en los periodos de estiaje, en especial de años secos, y puede evitar algunas inconsistencias al calcular los caudales que ingresan a los embalses.

En el caso del embalse de Cerrón Grande sería importante contar con información de la evaporación de tanque en sitios cercanos al embalse.

CUADRO 63
PLANTA CHIXOY: RESULTADOS DE SIMULACIONES, ESCENARIO B2, 2020 A 2100
(En porcentajes, grados Centígrados, milímetros, metros cúbicos por segundo y Gigawatts-hora)

Año	Escenarios CC			Balance			Evaporación			Caudal			Energía		
	P (%)	T (°C)	P (mm)	EVT (mm)	EVT/P (%)	(mm)	(m³/s)	(%)	(m³/s)	(%)	(m³/s)	(%)	(GW-h)	(%)	
Histórico			1 186	875	74	97,3	0,33		54,99				1 805		
2020	5	0,77	1 241	919	74	102,8	0,41	24	57,00	4			1 899	5	
2030	4	1,14	1 234	928	75	105,5	0,42	27	54,18	-1			1 806	0	
2050	4	1,50	1 230	937	76	108,2	0,43	30	51,79	-6			1 727	-4	
2070	3	2,37	1 226	961	78	114,8	0,45	37	46,92	-15			1 565	-13	
2100	0	3,06	1 186	961	81	120,2	0,47	42	39,79	-28			1 328	-26	

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1979-2008; P = precipitación, T = temperatura, EVT = evapotranspiración, EVT/P = la fracción de la precipitación que se convierte en evapotranspiración.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 64
PLANTA CERRÓN GRANDE: RESULTADOS DE SIMULACIONES, ESCENARIO B2, 2020 A 2100
(En porcentajes, grados Centígrados, milímetros, metros cúbicos por segundo y Gigawatts-hora)

Año	Escenarios CC			Balance			Evaporación			Caudal			Energía		
	P (%)	T (°C)	P (mm)	EVT (mm)	EVT/P (%)	(mm)	(m³/s)	(%)	(m³/s)	(%)	(m³/s)	(%)	(GW-h)	(%)	
Histórico			1 460	1 081	74	119,1	4,07		107,90				443		
2020	4	0,74	1 519	1 111	73	121,3	4,13	2	112,88	5			463	4	
2030	4	1,17	1 517	1 115	74	122,8	4,19	3	111,39	3			456	3	
2050	2	1,53	1 488	1 108	74	124,2	4,24	4	105,37	-2			429	-3	
2070	4	2,29	1 518	1 128	74	127,8	4,36	7	108,05	0			441	-1	
2100	-2	3,04	1 431	1 100	77	132,5	4,39	8	91,58	-15			369	-17	

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1984-2009; P = precipitación, T = temperatura, EVT = evapotranspiración, EVT/P = la fracción de la precipitación que se convierte en evapotranspiración.
Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 65
PLANTA CHIXOY: RESULTADOS DE SIMULACIONES, ESCENARIO A2, 2020 A 2100
 (En porcentajes, grados Centígrados, milímetros, metros cúbicos por segundo y Gigawatts-hora)

Año	Escenarios CC			Balance		Evaporación			Caudal		Energía	
	P (%)	T (°C)	P (mm)	EVT (mm)	EVT/P (%)	(mm)	(m ³ /s)	(%)	(m ³ /s)	(%)	(m ³ /s)	(GW-h)
Histórico			1 186	875	74	97,3	0,33		54,99			1,805
2020	-8	0,81	1 086	856	79	103,1	0,40	22	40,70	-26		1,359
2030	-14	1,10	1 024	833	81	105,2	0,41	24	33,82	-39		1,130
2050	-15	2,05	1 007	845	84	112,4	0,43	32	28,76	-48		961
2070	-25	3,34	889	796	90	122,4	0,47	41	16,39	-70		544
2100	-31	4,89	818	766	94	135,0	0,40	22	9,22	-83		305

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1979–2008; P = precipitación, T = temperatura, EVT = evapotranspiración, EVT/P = la fracción de la precipitación que se convierte en evapotranspiración.

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 66
PLANTA CERRÓN GRANDE: RESULTADOS DE SIMULACIONES, ESCENARIO A2, 2020 A 2100
 (En porcentajes, grados Centígrados, milímetros, metros cúbicos por segundo y Gigawatts-hora)

Año	Escenarios CC			Balance		Evaporación			Caudal		Energía	
	P (%)	T (°C)	P (mm)	EVT (mm)	EVT/P (%)	(mm)	(m ³ /s)	(%)	(m ³ /s)	(%)	(m ³ /s)	(GW-h)
Histórico			1 460	1 081	74	119,1	4,07		107,90			443
2020	-7	0,89	1 364	1 051	77	121,8	4,19	3	86,55	-20		348
2030	-12	1,16	1 282	1 017	79	122,8	4,24	4	73,30	-32		291
2050	-14	2,15	1 253	1 012	81	127,1	4,40	8	66,85	-38		263
2070	-22	3,33	1 135	959	84	135,2	4,63	14	48,75	-55		191
2100	-31	4,78	1 014	896	88	164,7	4,97	22	32,76	-70		126

Nota: Período histórico de referencia, promedio 1984–2009; P = precipitación, T = temperatura, EVT = evapotranspiración, EVT/P = la fracción de la precipitación que se convierte en evapotranspiración.

Fuente: Elaboración propia.

BALANCE DE AGUAS DE LAS CUENCAS

El balance de aguas muestra la interacción entre los parámetros más importantes del ciclo hidrológico y sus variaciones. De acuerdo con los resultados, la precipitación es el parámetro determinante en el efecto de los escenarios de cambio climático. La temperatura aunque aumenta la evapotranspiración en la cuenca, provoca cambios menores en la disponibilidad de agua.

En el escenario A2, en la cuenca del río Chixoy de Guatemala se estima un incremento gradual de la temperatura durante el período 2020 a 2100 de 4,9 °C, con respecto al promedio del período 1961–1990. Se estima una disminución gradual de la precipitación de aproximadamente 30% al final del período, esta disminución se observaría de forma más acelerada durante la segunda mitad del siglo. Como resultado se estima un incremento del 20% en la cantidad de lluvia que se pierde por la evapotranspiración incluyendo la evaporación directa y la transpiración de la vegetación. Con escenario B2 el incremento de la temperatura sería de manera gradual a lo largo del período hasta un valor aproximado de 3,0 °C al corte a 2100. Durante la mayor parte del período de estudio la precipitación sería mayor al promedio histórico en un 4,6% y 4,0% durante 2020 y 2030, este incremento sería cada vez menor y para 2100 se estima un valor de precipitación 0,1% inferior al promedio histórico. Con B2 se estima un incremento de 7% en la fracción de precipitación que se pierde por evapotranspiración.

Para la cuenca del río Lempa con A2 se estima un incremento de temperatura de 4,8 °C a 2100. Del mismo modo, la precipitación disminuiría de forma gradual y en 2100 se estima 30% menor que la observada durante el promedio histórico 1961-1990, una tercera parte de esta disminución se daría durante el período 2070-2100. Como resultado se estima un incremento del 14% en la proporción de lluvia que se pierde por evapotranspiración. Con B2 el incremento de temperatura sería de 3,0 °C y la precipitación sería aproximadamente 4% mayor a su valor histórico, hasta 2070. Para el corte 2100 se estima un valor de precipitación 2% menor que su valor histórico. Con este escenario se estima un incremento de 3% en la fracción de precipitación que se pierde por evapotranspiración.

La mayor parte de este incremento de la relación entre la evapotranspiración y la precipitación se debe a la disminución de la lluvia, lo que resulta en mayor pérdida de agua por evaporación, transpiración, infiltración, etc. Una conclusión es que la precipitación es el parámetro que determina en mayor medida la disponibilidad de agua en ambas cuencas.

El incremento de la proporción de lluvia que se pierde por evapotranspiración es una conclusión realista, pues el fenómeno podría estar ocurriendo ya, lo cual resultaría en un incremento de la demanda de agua para otros usos. Esto resultaría en una disponibilidad menor de caudales para generación de energía.

El modelo de simulación hidrológica asume una situación estacionaria de las cuencas, sin modificaciones. Es deseable utilizar modelos que incluyan este parámetro. En este sentido, el uso de modelos más sofisticados que incorporen otros parámetros como uso del suelo y población debe ser considerado, tomando en cuenta las experiencias de la región. Estos modelos requieren información desagregada no siempre disponible, además de entrenamiento especializado.

Por otra parte, en las simulaciones se han asumido condiciones promedio de la distribución del agua. Sin embargo, la realidad es que en años secos o húmedos la distribución del agua puede ser muy diferente a la distribución media. Durante años secos, el período de estiaje puede ser muy

severo y prolongado, mientras que en años húmedos la temporada de lluvias puede ser muy intensa en momentos determinados, como la ocurrencia de ciclones tropicales. Estas condiciones tienen efecto sobre la disponibilidad de agua y deben ser estudiadas con mayor profundidad.

Antes de emprender una simulación con un modelo hidrológico que incorpore otros parámetros, debe considerarse que el cambio de uso de suelo podría no variar en forma sustancial la disponibilidad de agua, aunque podría modificar su distribución. Los vegetales, incluidos los bosques, consumen agua, pero al mismo tiempo regulan su flujo en las cuencas y protegen el suelo. Probablemente el cambio de uso del suelo de bosque a uso agrícola y ganadero, como es la tendencia en la región centroamericana, tenga un efecto más sensible en la erosión de las cuencas que en la disponibilidad de agua. Por otra parte, el efecto del aumento de la población en la calidad del agua es mayor que sobre su cantidad, excepto cuando se transportan volúmenes importantes a las ciudades.

CAUDALES DISPONIBLES

Los resultados de la simulación de la operación de los embalses en las condiciones de los escenarios de cambio climático indican que los caudales se reducen o se incrementan en proporción similar a la precipitación si las diferencias de precipitación respecto de las condiciones actuales no son muy grandes, aunque las pérdidas por evapotranspiración aumenten por el aumento de la temperatura.

Los caudales se incrementan o se reducen en proporción mayor que la de la precipitación cuando ésta disminuye o aumenta en forma sustancial. En el caso del embalse de Chixoy, en el escenario A2 al corte 2100, una reducción de 31% de la lluvia provocaría una reducción del caudal en 83%. En la cuenca del río Lempa, en las mismas condiciones, una reducción del 31% de la lluvia provocaría una reducción del caudal de 70%. Esto se debe a que la evapotranspiración en condiciones normales de temperatura es relativamente estable, mientras que los excesos y los déficits de lluvia se traducen en excesos o déficits del caudal.

De acuerdo con la simulación de las cuencas en los escenarios de cambio climático, los caudales de la presa del Chixoy se reducirían gradualmente hasta en un 83% en el escenario A2. Los caudales de la presa de Cerrón Grande se reducirían hasta en un 71% con importante variabilidad inter-anual en el escenario A2 a largo plazo.

En el escenario B2, los efectos del cambio climático en el Chixoy se relacionarían más directamente con el aumento de la temperatura. Por ejemplo, en 2100 habría muy poco cambio de precipitación respecto del período histórico, pero un aumento de temperatura de 3 °C resultaría en una reducción del caudal en 28%. En el caso de Cerrón Grande, una reducción de 2% de la precipitación y un aumento de temperatura de 3 °C podrían resultar en una reducción del caudal de 15%.

Debido a que en las simulaciones se ha asumido una distribución promedio del agua, su disponibilidad puede ser menor debido a que la distribución puede variar mucho, especialmente en años secos.

Las plantas hidroeléctricas a filo de agua o con embalses de regulación diaria no fueron consideradas en este estudio, pero es evidente que resultarían muy afectadas en un escenario de reducción de caudales por la falta de capacidad de almacenamiento en la temporada de agua abundante.

Por otra parte, es evidente que el deterioro de las cuencas y la disminución de su capacidad de almacenamiento por la sedimentación de los embalses afectan la disponibilidad presente de agua y la afectarán con más severidad en el futuro. Estos elementos no han sido considerados en el estudio, pero sus efectos serán muy importantes, por lo que se requiere estimarlos.

EVAPORACIÓN DE LOS EMBALSES

De acuerdo con los escenarios de cambio climático, las pérdidas de los embalses por evaporación aumentarían a lo largo del siglo, fenómeno principalmente relacionado con la alza progresiva de la temperatura. En el embalse de Chixoy, bajo el escenario más pesimista (A2), la evaporación incrementaría progresivamente hasta en 41% (de 0,33 m³/s a 0,47 m³/s) para el corte a 2070 pero para el corte de 2100 disminuiría a un valor de 0,40 m³/s debido al menor ingreso de agua al embalse. Con B2 se observaría un incremento progresivo de la evaporación, especialmente a partir de 2050, hasta un valor máximo de 0,47 m³/s en 2100. En Cerrón Grande las pérdidas por evaporación ya son mucho mayores que en Chixoy y aumentarían progresivamente a lo largo del período, especialmente a partir de 2050. Con A2 se espera que alcance un valor máximo de 4,97 m³/s a 2100, es decir un incremento del 22% con respecto a su valor histórico. En el escenario menos pesimista (B2) la pérdida sería menor, alcanzando hasta 8% con un valor máximo de 4,39 m³/s en 2100. En términos absolutos, las pérdidas adicionales por evaporación serían mayores en el embalse de Cerrón Grande, de 0,9 m³/s con A2 y 0,32 m³/s con B2, en comparación con los 0,14 m³/s en Chixoy con ambos escenarios.

GENERACIÓN DE ENERGÍA

La producción de energía de ambas plantas sigue de cerca el comportamiento del caudal. La energía producida por la planta del Chixoy se reduce prácticamente en la misma proporción que el caudal, pero el incremento del caudal no se traduce en un aumento proporcional de energía. En la planta de Cerrón Grande, pequeños incrementos o decrementos del caudal medio anual se traducen en incrementos o decrementos proporcionales de energía. En la planta del Chixoy, incrementos mayores de caudal producen incrementos menores de energía. Esto se debe a que la potencia disponible en Cerrón Grande permite aprovechar prácticamente todo el caudal disponible para generación. Decrementos mayores del caudal anual medio se traducen en decrementos proporcionales de producción de energía en ambas presas.

Las estimaciones de generación de energía varían según el escenario considerado y los años de corte 2020, 2030, 2050, 2070, y 2100. En el escenario más pesimista (A2) se estiman reducciones superiores al 20% en ambas plantas para el corte 2020 respecto a la generación promedio de los períodos de referencia (1979 a 2008 para la planta de la cuenca del Chixoy y 1984 a 2009 para la cuenca del Lempa). A partir del corte 2050, las reducciones serían superiores al 40% en ambas hidroeléctricas. Para la hidroeléctrica del Chixoy, en el escenario A2, se esperan reducciones aproximadas de 25% en 2020, 37% en 2030, 47% en 2050, 70% en 2070 y 83% en 2100. Para la hidroeléctrica del Lempa, en el mismo escenario, se esperan reducciones de 22% en 2020, 34% en 2030, 41% en 2050, 57% en 2070 y 71% en 2100. En el escenario menos pesimista (B2), en cambio, se espera un incremento de entre 4% y 6% en ambas plantas para el corte de 2020 respecto al período histórico de referencia. A partir de esta fecha, los estimados se vuelven negativos hasta llegar a una disminución de 26% en Chixoy y 17% en Lempa a 2100.

La energía generada es máxima los meses en los que el caudal que ingresa a los embalses es mayor que el caudal turbinado. En ambas presas, el período de llenado dura cinco meses, entre junio y octubre. Este patrón cambiaría en la planta de Cerrón Grande en las condiciones de sequía extrema de ambos escenarios en el corte de 2100. En este caso, las plantas generarían más energía durante el período de vaciado del embalse debido a que el llenado del embalse se beneficiaría.

Aunque la pérdida de generación de energía por la disminución de caudales debido al aumento de temperatura no es sensible a nivel anual, su efecto puede ser importante durante el estiaje. Este factor afecta la generación de todo tipo de plantas hidroeléctricas, pero su efecto será mayor en las plantas que operan a filo de agua y en los embalses de regulación diaria debido a la falta de regulación de los caudales en el período de agua abundante y a que los estiajes serán más severos a causa de temperaturas más elevadas. Esto daría como resultado que la producción de energía disminuya, en especial en las plantas a filo de agua y las de embalse de regulación diaria. El mismo efecto se observaría en la energía firme de las plantas. Aunque esto puede estar presentándose en la actualidad, su efecto no es sensible debido a que el período actual es húmedo, como lo indican las series históricas.

La generación de energía disminuirá gradualmente por la pérdida de capacidad de almacenamiento a causa de la sedimentación de los embalses. Este es un factor muy importante que debe ser considerado en los planes de generación futura.

VALORACIÓN DE LA ENERGÍA

Estimar valores de la variación de la energía generada es una tarea compleja porque los valores de los países difieren. Una forma de obtener valores comparables es estimar el valor de la energía perdida por efectos climáticos en términos de la energía que sería producida por una planta térmica. La energía no producida por plantas hidráulicas en la región probablemente será producida por plantas térmicas, cuyo valor es más comparable entre los países. Otra opción es convertir la cantidad de energía a su equivalente en barriles de petróleo y estimar el valor de las variaciones según el precio internacional del petróleo.

VALORACIÓN DE LAS ACCIONES

Algunas acciones recomendadas, como la protección de los bosques, la reforestación y las prácticas adecuadas de uso del suelo, son difíciles de cuantificar. Esto se debe a que las variaciones del ciclo hidrológico que inducen estas prácticas son cuantitativamente menores que las variaciones normales causadas por la variabilidad del clima. Lo más recomendable es valorar las acciones por sus ventajas en términos de beneficios al ambiente y de la productividad, como la captura de gases de efecto invernadero en los bosques y la mejora de la productividad agrícola por la conservación del suelo. Una mejora directa del ciclo hidrológico es la reducción de la erosión de las cuencas y del transporte de sedimentos. Este tema no fue incluido en este trabajo porque requiere un análisis e información específicos. La valoración de la reducción del transporte de sedimentos en los sitios de las presas no es posible por la alta variabilidad del parámetro, a menos que se haga en forma indirecta, estimando la reducción del aporte de las cuencas.

6. RECOMENDACIONES

DATOS BÁSICOS

CORTO PLAZO

Se recomienda incluir la evaporación de la superficie libre de los embalses en el cálculo del balance de éstos, y por lo tanto, instalar una estación meteorológica que incluya la observación de evaporación de tanque cerca del embalse de Cerrón Grande.

LARGO PLAZO

Se recomienda ampliar la cobertura de las estaciones meteorológicas de ambas cuencas, tendiendo a alcanzar la cobertura mínima recomendada por la OMM. En especial se recomienda instalar estaciones meteorológicas en las partes altas de las cuencas.

ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

CORTO PLAZO

Se recomienda continuar el análisis de los escenarios de cambio climático, sobre todo de precipitación. En este estudio el efecto del cambio climático se ha evaluado a partir de promedios móviles de períodos de diez años de temperatura y precipitación en cada corte temporal, para identificar las tendencias. Se recomienda hacer un análisis de la variabilidad climática histórica y de los escenarios de las próximas décadas, considerando que se podrían esperar años muy secos y años muy húmedos, incluyendo eventos extremos más severos que los experimentados hasta la fecha.

BALANCE DE AGUAS DE LAS CUENCAS

CORTO PLAZO

Se recomienda utilizar modelos que incluyan el uso de suelo y el incremento de la población, tomando en cuenta sus probables efectos y los recursos necesarios. Se recomienda analizar el efecto del incremento de temperatura en la generación de energía durante períodos secos. Este efecto podría estar ocurriendo ya, así que merece atención urgente para planificar la producción de energía futura.

LARGO PLAZO

Se recomienda mejorar la eficiencia de todos los sistemas que utilizan agua, además de la generación hidroeléctrica, porque se prevé una menor disponibilidad del recurso.

Se recomienda implementar el manejo adecuado de las cuencas y la regulación del ciclo hidrológico para evitar la erosión de los suelos y la sedimentación de los embalses. Para esto se

requieren proyectos de reforestación y prácticas adecuadas de uso de suelo y agua en zonas de riego. Hay casos exitosos de integración de la reforestación de la cuenca a proyectos de hidroeléctricas, aunque sus beneficios son limitados por el régimen de propiedad de la tierra en algunos casos.

CAUDALES DISPONIBLES

LARGO PLAZO

Se recomienda optimizar la operación de los sistemas de aprovechamiento de agua, incluyendo la de las plantas hidroeléctricas. Se recomienda implementar sistemas de almacenamiento estacional para compensar el efecto de la disminución de caudales durante los períodos de estiaje.

EVAPORACIÓN DE LOS EMBALSES

CORTO PLAZO

Se recomienda incluir el parámetro de evaporación en el cálculo del balance de los embalses. Los resultados de las simulaciones sugieren que la operación adecuada de los embalses podría reducir este tipo de pérdidas, por lo que se recomienda su investigación.

LARGO PLAZO

En los estudios futuros deberá discutirse la adaptación de los proyectos de embalses futuros en la adaptación al cambio climático. Tales son los casos del proyecto El Tigre (binacional con Honduras) en la cuenca del Lempa y los proyectos aguas arriba (Serchil) en la cuenca del Chixoy. Deberá considerarse que el Chixoy es afluente del Usumacinta (binacional con México), el cual carece de infraestructura de embalses. Por otra parte, el Usumacinta–Grijalva desemboca en Villa Hermosa, Tabasco, México, muy afectada por inundaciones y amenazada por el posible aumento del nivel del mar.

GENERACIÓN DE ENERGÍA

CORTO PLAZO

Se recomienda revisar los modelos de operación de los embalses de las plantas para optimizar la generación de energía ante los escenarios de reducción de caudales. Se recomienda estudiar el efecto de los escenarios de cambio climático en la generación de energía de plantas que operan a filo de agua o con embalses de regulación diaria, en especial el efecto en la generación durante el estiaje.

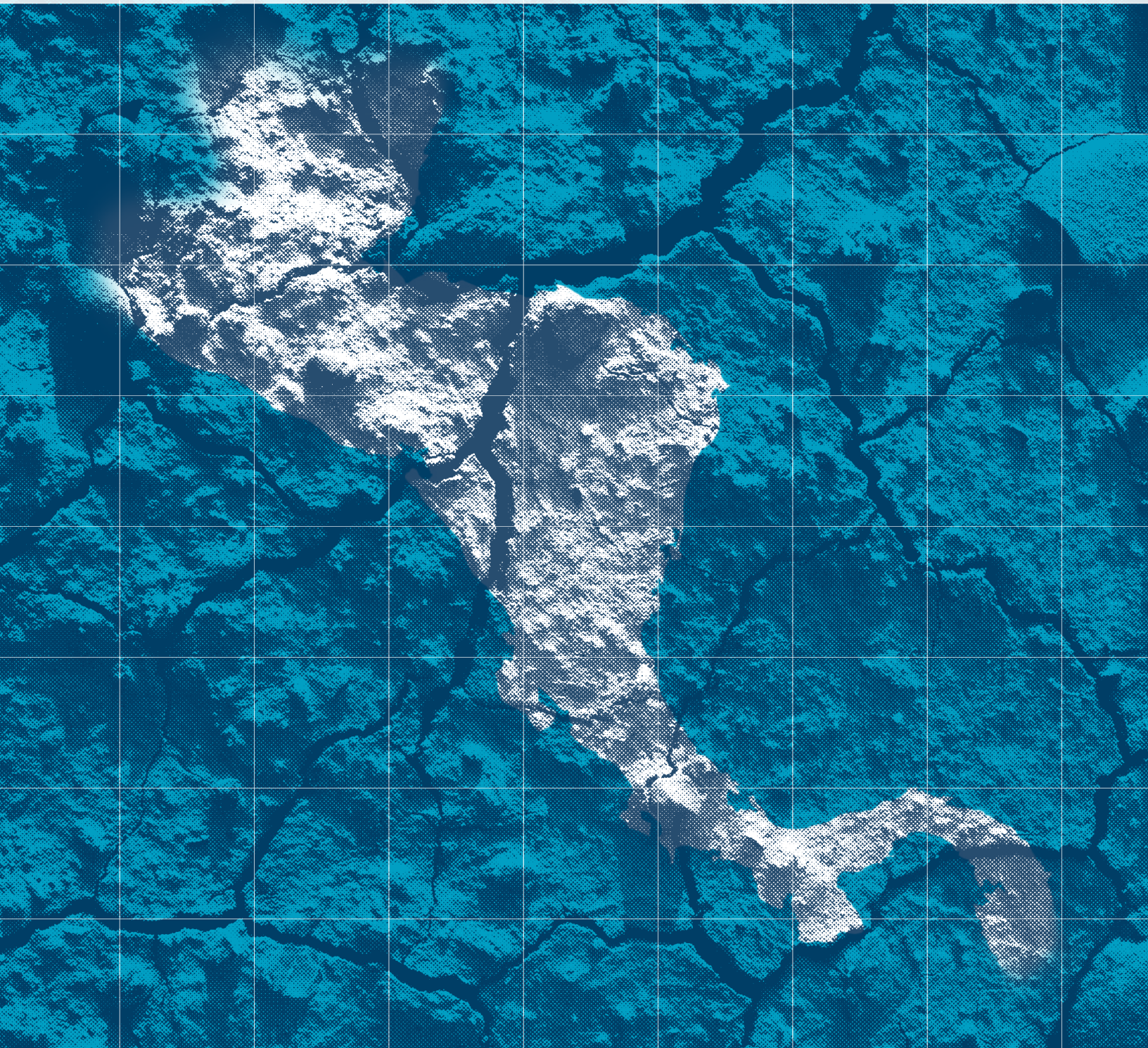
LARGO PLAZO

A fin de asegurar el abastecimiento de agua para generar energía y otras actividades relacionadas con los recursos hídricos se recomienda considerar la construcción de embalses, por lo menos, de regulación estacional. Se recomienda estudiar el proceso de colmatación de los embalses para cuantificar la disminución de capacidad de generación de las plantas hidroeléctricas, preparar planes de sustitución de generación de energía y recuperar embalses.

BIBLIOGRAFÍA

- CEPAL (Comisión para América Latina y el Caribe), CCAD/SICA (Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo), UKAID (UK Department for International Development) y DANIDA (Agencia de Desarrollo Internacional de Dinamarca) (2011), *La economía del cambio climático en Centroamérica*. Reporte técnico 2011, (LC/MEX/L.1016), México, D.F.
- CEPAL/CCAD/SICA/UKAID (2010), *La economía del cambio climático en Centroamérica*. Síntesis 2010 (LC/MEX/L.978), México, D. F.
- CEPAL/DFID (UK Department for International Development) (2009), *La economía del cambio climático en Centroamérica*. Informe de factibilidad (LC/MEX/L.897), México, D.F.
- CEPAL/SICA (2007), *Estrategia Energética Sustentable Centroamericana 2020* (LC/MEX/L.828), México, D.F.
- Erazo, A. (2006), *¿Variaciones Hidroclimáticas o Evidencias de Cambio Climático en El Salvador?*, SNET, El Salvador.
- Erazo, A. (2004), *Regionalización de Caudales Máximos y Medios en El Salvador*, SNET, El Salvador.
- Erazo, A. (s/f), *Estimaciones de Caudales Medios a través de Metodología Relación-Escorrentía*, El Salvador.
- Hijmans, R. y otros (2005), «Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas», *International Journal of Climatology*, vol. 25, N° 15.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (2000), *Climate Change 2000: IPCC Special report on emissions scenarios*. A special report of IPCC Working Group III, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (US), Environmental Molecular Sciences Laboratory (US).
- López Choc, F. (2002), *Estudios de las Cuencas de los Ríos Suchiate y Naranjo. Segunda Fase del Programa de Adquisición de Información Hidrometeorológica para Desarrollo de Proyectos Hidroeléctricos*. Ministerio de Energía y Minas, Banco Mundial, Guatemala.
- Mancilla, E., A. Brenes y L. Romano, (2009), *Eventos Extremos y Cambio Climático en Centroamérica*, Informe Final, Guatemala.
- MARN Guatemala (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales) (2007). *Síntesis de Estudios de Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático*, MARN-NCAP, Guatemala.
- Programme for National Hydropower Development (1999), *Report on Hydrological Activities in North Pakistan Government of Pakistan*, Ministry of Water and Power , en colaboración con la German Agency for Technical Cooperation, Lahore.

Esta publicación es un producto de la iniciativa “La Economía del Cambio Climático en Centroamérica”, coordinada por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), con las Autoridades de Ambiente y su Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD), los Ministerios de Hacienda o Finanzas y su Consejo de Ministros de Hacienda o Finanzas de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (COSEFIN) y la Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA) del Sistema de Integración Centroamericana (SICA). El proyecto cuenta con el financiamiento de UKaid del Ministerio para el Desarrollo Internacional (DFID) del Gobierno Británico y de la Agencia de Cooperación para el Desarrollo de Dinamarca (DANIDA).



Sede Subregional de la CEPAL en México
Edificio Corporativo MCS
Av. Miguel de Cervantes Saavedra #193, piso 12
Col. Granada, Del. Miguel Hidalgo CP11520, México, DF, México
Tel. (52 55) 4170-5600 Fax. (52-55) 5531-1151
www.cepal.org/mexico/cambioclimatico

Sistema de la Integración Centroamericana (SICA)
Final Bulevar Cancillería, Distrito El Espino, Ciudad Merliot
Antiguo Cuscatlán La Libertad, El Salvador, Centroamérica
Tel. (503) 2248-8800 Fax. (503) 2248-8899
www.sica.int