

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ECONOMÍA DE LOS RECURSOS
NATURALES Y DEL AMBIENTE**



**“PRODUCTIVIDAD DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA
GERA ANTE VARIACIONES DE LA COBERTURA FORESTAL
EN MOYOBAMBA, PERÚ”**

Presentada por:

ROXANA YANETT DÍAZ VEGA

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE EN ECONOMÍA DE LOS RECURSOS
NATURALES Y DEL AMBIENTE**

Lima - Perú

2020

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA
ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ECONOMÍA DE LOS RECURSOS NATURALES
Y DEL AMBIENTE**

**“PRODUCTIVIDAD DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA
GERA ANTE VARIACIONES DE LA COBERTURA FORESTAL
EN MOYOBAMBA, PERÚ”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

ROXANA YANETT DÍAZ VEGA

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Mg.Sc. ~~Juan Magallanes~~ Díaz
PRESIDENTE

Dr. Álvaro Ortiz Sarabia
ASESOR

Mg.Sc. Miguel Alcántara Santillán
MIEMBRO

Dr. Carlos Orihuela Romero
MIEMBRO

DEDICATORIA

A Justina y Alberto, quienes me enseñaron con el ejemplo;
y a Diego, por quien me esfuerzo en ser un ejemplo por
seguir.

AGRADECIMIENTOS

A Justina, Alberto, José, Christian, Melissa, Diego y Alina, mi familia, por su motivación y soporte emocional para culminar la maestría y esta investigación.

Al Dr. Álvaro Ortiz Sarabia por su asesoría, soporte y paciencia durante esta investigación.

A mi jurado, Mg. Sc. Juan Magallanes, Mg. Sc. Miguel Alcántara y Dr. Carlos Orihuela, por sus observaciones y recomendaciones. La atención de estas aseguró que la tesis cumpla los estándares que el grado amerita.

A Daniel, Alonso, Ofelia, Gladys, Guisselle, Yanina, Yuliana, Melissa y Mauricio, mis amigos, por recordarme constantemente que debo terminar la tesis. Un especial agradecimiento a Daniel, por ayudarme a creer que era posible.

A Anna Zucchetti, Genna Gammie y Rita Vilca, profesionales que me brindaron facilidades e información para realizar mi investigación.

A la Fundación *Forest Trends*, la Asociación Amazónicas por la Amazonía - AMPA, Electro Oriente S.A. y la Universidad Científica del Sur, instituciones que me brindaron las facilidades necesarias para desarrollar mi investigación.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. MARCO TEÓRICO	4
2.1.1. Características técnicas de la generación hidroeléctrica	4
2.1.2. Características económicas de la generación hidroeléctrica.....	6
2.1.3. Servicios ecosistémicos del bosque en la producción de energía hidroeléctrica.....	8
2.1.4. Medidas de bienestar	9
2.1.5. Valoración económica de servicios ecosistémicos	12
2.1.6. Función de producción de la energía hidroeléctrica.....	13
2.1.7. Mercado de la generación eléctrica en el Perú	16
2.2. ANTECEDENTES	18
III. MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1. HIPÓTESIS	22
3.1.1. Hipótesis general	22
3.1.2. Hipótesis específicas	22
3.2. METODOLOGÍA	22
3.2.1. Tipo de investigación	22
3.2.2. Área de estudio	23
3.2.3. Diseño de la investigación.....	27
3.2.4. Construcción de variables de análisis.....	34
3.2.5. Fuentes de información	36
3.2.6. Limitaciones de la investigación	39
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
4.1. EFECTO FÍSICO DEL BOSQUE EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA	41
4.2. FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA POR LA CH GERA.....	47
4.3. PRODUCTIVIDAD MARGINAL DE LA COBERTURA FORESTAL EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA POR LA CH GERA.....	51

4.4. VALOR ECONÓMICO ATRIBUIDO A LA COBERTURA FORESTA DEL BOSQUE HÚMEDO DE LA CUENCA DEL RÍO GERA.....	52
V. CONCLUSIONES	57
VI. RECOMENDACIONES.....	57
VII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
VIII. ANEXOS	72

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Resumen de estudios sobre la valoración de los servicios ecosistémicos del bosque respecto a la producción de energía hidroeléctrica.	20
Tabla 2: Características técnicas de la CH Gera.....	24
Tabla 3: Características físicas y geomorfológicas de la cuenca del río Gera.....	26
Tabla 4: Cobertura forestal y tasa de deforestación anual del área priorizada de la cuenca del río Gera para el período 2006 a 2014.	43
Tabla 5: Sedimentos aportados por la cuenca del río Gera en el período 2005 al 2014.	44
Tabla 6: Información de área de cobertura forestal y caudales para las microcuencas pares.....	47
Tabla 7: Resultados de la segunda estimación del modelo econométrico.....	48
Tabla 8: Modelo econométrico de la producción energía hidroeléctrica por la CH Gera.	49

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Esquema de funcionamiento de una central hidroeléctrica de embalse	5
Figura 2: Medidas de bienestar	10
Figura 3: Variación del excedente del productor	10
Figura 4: Variación de la medida de bienestar de un productor de un solo producto a partir de la función de costo agregado.....	11
Figura 5: Dinámica del mercado eléctrico peruano	17
Figura 6: Ubicación y conexión al SEIN de la CH Gera.	23
Figura 7: Diagrama de la operación de la CH Gera.	24
Figura 8: Distribución de la cuenca del río Gera y ubicación de la CH Gera.....	25
Figura 9: Construcción de las variables de análisis.....	36
Figura 10: Ubicación de la estación de caudal y las estaciones meteorológicas.....	38
Figura 11. Esquema de la dinámica de la actividad de generación hidroeléctrica.....	41
Figura 12: Relaciones físicas de la deforestación consideradas en la valoración del bosque húmedo de la Cuenca del Gera.	42
Figura 13: Superficie del bosque de las microcuencas priorizadas de la cuenca del Gera y la tasa de su deforestación para el periodo 2006-2014.	44
Figura 14: Comparación anual de Sedimentos (Ton/año) en relación al Caudal (m^3/s) versus Cobertura forestal (km^2).	45
Figura 15: Comparación del caudal versus el caudal base de la cuenca Gera para el periodo 2006-2014.....	45
Figura 16: Energía real ajusta (LENG_SA real) versus Energía proyectada con la función de producción de la energía hídrica por la CH. Gera I.	51
Figura 17: Representación gráfica de la variación de bienestar de la CH Gera ante cambios de la cobertura forestal.....	52

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Esquema gráfico simplificado de la operación de Gera I de la CH Gera.	72
Anexo 2: Características técnicas de las turbinas, generadores y transformadores de la CH Gera.....	73
Anexo 3: Distribución de las propiedades y de los centros poblados de la cuenca del río Gera.....	74
Anexo 4: Registro fotográfico de la visita técnica realizada a la CH Gera del 15 al 17 de agosto de 2016.	75
Anexo 5: Ubicación y cobertura forestal de las microcuencas seleccionadas para el análisis de cuencas pares.	78
Anexo 6: Metodología para la determinación del aporte de sedimentos de la cuenca del Gera.....	79
Anexo 7: Estimación de variable dicotómica SEC.....	81
Anexo 8. Estimación de variable cualitativa DESC.....	81
Anexo 9: Pérdida de bosque, bosque remanente y tasa de deforestación del departamento de San Martín y la cuenca del Gera.	82
Anexo 10: Análisis de estacionalidad: Prueba de Raíz cuadrada.....	83
Anexo 11: Estadísticas descriptivas del las variables explicativas inicialmente propuesta de la producción de energía hidroeléctrica de la CH Gera.....	91
Anexo 12: Resultados de la primera estimación del modelo econométrico para la forma funcional tipo Cobb Douglas.....	92
Anexo 13: Resultados de la primera estimación del modelo econométrico para la forma funcional tipo Translogarítmica.....	93
Anexo 14. Resultados de la primera estimación del modelo econométrico para la forma funcional tipo Cuadrática.....	94
Anexo 15: Análisis de heterocedasticidad: Prueba White.....	95
Anexo 16. Análisis de multicolinealidad: Matriz de correlación de las variables de la función de producción.	95
Anexo 17: Análisis de autocorrelación: Prueba Breusch-Godfrey Serial Correlation -LM.	96
Anexo 18: Análisis de correcta estimación del modelo: Prueba Ramsey RESET.....	97

ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

AMPA	Amazónicos por la Amazonía
CH	Central Hidroeléctrica
COES	Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional
CONDESAN	Consortio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina
DGE	Dirección General de Electricidad del Ministerio de Energía y Minas
ELOR	Empresa de Servicio Público de Electricidad del Oriente S.A
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática
LCE	Ley de Concesiones Eléctricas aprobada mediante el Decreto Ley N° 25844
MEA	<i>Millennium Ecosystem Assessment</i>
MERESE	Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos
MINAM	Ministerio del Ambiente
MINEM	Ministerio de Energía y Minas
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
OSINERGMIN	Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería
PNCBMCC	Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático
SEIN	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
SERFOR	Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>
ZoCRE	Zona de Conservación y Recuperación de Ecosistemas Gera – Sisa – Organero

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de la superficie de la cobertura del bosque húmedo de la cuenca del río Gera en la generación de energía hidroeléctrica de la CH Gera ubicada en Moyobamba, San Martín; departamento con la mayor área deforestada a nivel nacional en el periodo 2001-2017. Para ello, a partir de una base de datos de 108 registros mensuales del período 2006-2014, se elaboró la función de producción de energía hidroeléctrica de la CH Gera y se estimó el valor económico de los servicios ecosistémicos de regulación hídrica y control de sedimentos del bosque húmedo de la cuenca del río Gera mediante la aplicación del método de cambios en la productividad. En la determinación del modelo econométrico de producción se incluyó la superficie de la cobertura forestal como un factor de producción y se analizaron las formas funcionales Cobb Douglas linealizada, translogarítmica y cuadrática. Solo la función del tipo Cobb Douglas linealizada fue validada económica y estadísticamente. Se encontró que la producción de la energía hidroeléctrica por la CH Gera depende de la precipitación, la cobertura forestal y la temperatura ambiental máxima, donde las dos primeras variables presentan una relación directa y la última variable presenta una relación indirecta. Asimismo, la productividad marginal de la superficie de la cobertura forestal fue de 36,963 KWh/km² y el valor económico del bosque húmedo de la cuenca del río Gera fue de 237 USD/ha/año, demostrando que el área del bosque húmedo de la cuenca del río Gera impacta de manera positiva en la generación de energía hidroeléctrica para el caso de estudio. Estos resultados constituyen una oportunidad de cuantificar el impacto económico de la implementación de estrategias de reforestación y conservación de bosques en la operación de Centrales Hidroeléctricas ubicadas en cuencas hidrográficas con similares características.

Palabras clave: Energía hidroeléctrica, bosque, cambios de productividad, productividad marginal, función de producción.

ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate the effect of the forest surface of the Gera river basin in the generation of hydroelectric power of the CH Gera located in Moyobamba, San Martín, department with the national largest deforested area in 2001-2017. For this, based on a database of 108 monthly records for the period 2006-2014, the hydroelectric power production function of the CH Gera was prepared, and the economic value of the ecosystem services of water regulation and sediment control was estimated. of the Gera river basin forest by applying the method of changes in productivity. In determining the econometric production model, the forest cover area was included as a production factor and the linearized, translogarithmic and quadratic Cobb Douglas functional forms were analyzed. Only the linearized Cobb Douglas type function was economically and statistically validated. It was found that the production of hydroelectric energy by the CH Gera depends on precipitation, forest surface and maximum environmental temperature, where the first two variables have a direct relationship and the last variable has an indirect relationship. Likewise, the marginal productivity of the forest cover area was 36,963 KWh/km² and the economic value of the humid forest of the Gera river basin was USD 237/ha/year, demonstrating that the forest surface of the basin of the Gera river has a positive impact on the generation of water energy for the case study. These results constitute an opportunity to quantify the economic impact of the implementation of reforestation and forest conservation strategies in the operation of Hydroelectric Power Plants located in hydrographic basins with similar characteristics.

Key words: Hydropower, forest, productivity changes, marginal productivity, production function.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la energía hidroeléctrica aporta el 60 por ciento de la electricidad generada a partir de fuentes renovables (REN21 2019) y representa el 16 por ciento de la energía total generada (IEA 2019). En Perú, es también la principal fuente de energía renovable (mayor al 90 por ciento) y aporta el 56 por ciento de la producción de energía eléctrica a nivel nacional (MINEM 2019).

Históricamente, la producción nacional de energía hidroeléctrica se ha incrementado de manera continua, pasando de 5798 GWh en 1976 a 30737 GWh en 2018 (INEI 2019, MINEM 2019), un incremento del 430 por ciento en ese periodo de tiempo. Se espera que esa tendencia continúe porque actualmente solo se aprovecha el 7.6 por ciento de nuestro potencial hidroeléctrico (Halcrow y OIST 2011).

El desarrollo de la generación de energía hidroeléctrica en nuestro país se sustenta en nuestra orografía, sus bajos costos operativos, flexibilidad¹ y eficiencia, entre otros (Tamayo et al. 2016, World Energy Council 2016). Asimismo, se considera que la promoción de la inversión en esta actividad es importante porque produce energía hidroeléctrica con bajas emisiones de CO₂ y es un respaldo para a las energías renovables no convencionales (Dammert et al. 2019).

Sin perjuicio de ello, la generación de energía hidroeléctrica depende de la disponibilidad del recurso hídrico que puede verse afectada por dos factores: la estacionalidad del recurso y los eventos climáticos extremos (Dammert et al. 2019). Por ello, se deben desarrollar estudios y estrategias que permitan asegurar la continuidad de la generación de energía hidroeléctrica.

Al respecto, tradicionalmente se ha considerado que los árboles actúan como una esponja que capta el agua en condiciones de abundancia y la libera en condiciones de escasez por lo que se les ha relacionado con la disponibilidad del recurso hídrico en diferentes actividades,

¹ Una CH puede variar su producción en un periodo muy corto.

incluyendo la generación de energía hidroeléctrica. Sin embargo, diversos estudios han demostrado que la eliminación parcial o completa de la cobertura forestal aumenta la cantidad total de agua disponible, debido principalmente a la disminución de la evapotranspiración de los árboles (Bruijnzeel 2004, FAO 2008).

La excepción a lo señalado en el párrafo anterior es la reducción de los bosques nubosos (montanos tropicales y subtropicales) porque en estos ecosistemas el ingreso del agua al suelo se realiza por la precipitación y por la captación de la niebla por los árboles (Bruijnzeel 2004, FAO 2008).

Surge entonces la pregunta sobre cuál es el rol del bosque en la generación de la energía hidroeléctrica. Se considera que el bosque brinda los servicios ecosistémicos de regulación hídrica (especialmente en eventos extremos) y en el control de sedimentos, los que aportan a mantener la calidad y disponibilidad del recurso para la generación de energía hidroeléctrica (Atlason y Unnthorsson 2014, Cheng et al. 2015, Stickler et al. 2013).

Sin embargo, el impacto de la pérdida de la superficie de la cobertura forestal en el sector hidroeléctrico depende del tipo de zona de vida, del balance hídrico relacionado al consumo del agua por los árboles y a los beneficios de los servicios ecosistémicos ya mencionados (Barrow et al. 1986; Bruijnzeel 2004, Guo et al. 2007; Sáenz y Mulligan, 2013, Zimmermann et al., 2010).

En Perú, el impacto de la deforestación en la actividad de generación hidroeléctrica podría ser crítico porque el 87.3 por ciento del potencial hidroeléctrico se encuentra en la vertiente del Atlántico (Halcrow y OIST 2011), zona que alberga el bosque nuboso de nuestro país (MINAM, 2014), y el 64 por ciento de la deforestación se concentra en los departamentos de Ucayali, Madre de Dios, Loreto y San Martín (SERFOR 2018).

Ante este contexto, se considera relevante determinar el efecto del área de la cobertura forestal en la producción de las centrales hidroeléctricas, tomando como caso de estudio a la CH Gera ubicada en el departamento de San Martín porque este departamento ocupó la cuarta posición en la superficie de bosque en 2017 que incluye bosques nubosos (SERFOR 2018); pero presentó la mayor superficie deforestada a nivel nacional en 2001-2017 (SERFOR 2018). Asimismo, es el único de los departamentos con mayor deforestación que posee una central hidroeléctrica, la CH Gera (COES 2019a).

Por ello, la presente investigación estima el valor económico de la cobertura del bosque de la cuenca del río Gera mediante el método de cambios de la productividad, considerando que el bosque impacta en la producción de la CH Gera mediante el caudal de agua disponible y el aporte de sedimentos. Esta investigación pretende contribuir al desarrollo de la actividad de generación hidroeléctrica porque brinda un panorama amplio del valor económico del bosque respecto a la producción de energía hidroeléctrica, proporcionando información nacional para la elección de las mejores estrategias y medidas de política pública que contribuyan a la disponibilidad del recurso hídrico, la seguridad y eficiencia del sector; y al bienestar social (MINAM 2016).

En ese sentido, la investigación tuvo como objetivo general evaluar el efecto de la cobertura del bosque húmedo de la cuenca del río Gera en la generación de energía hidroeléctrica de la CH Gera ubicada en Moyobamba, San Martín, aplicando el método de cambios de la productividad.

Los objetivos específicos fueron: i) Identificar el efecto físico del área de la cobertura forestal en la producción de energía hidroeléctrica; ii) estimar la función de producción de energía hidroeléctrica de la CH-Gera considerando al área de la cobertura forestal como un factor de producción iii) estimar el valor económico de la superficie de la cobertura forestal en la generación de energía hidroeléctrica por la CH-Gera a partir de la productividad marginal.

Para tal efecto, en el capítulo I de este documento se introduce la investigación; en el capítulo II se realiza la revisión bibliográfica, incluyendo los fundamentos de la energía hidroeléctrica, las características del sector, y la teoría económica y de los servicios ecosistémicos en estudio; en el capítulo III se describe la metodología incluyendo la estimación de funciones de producción tipo Cobb Douglas, translogarítmica y cuadrática; en el capítulo IV se presentan y discuten los resultados; en el capítulo V se muestran las conclusiones; y finalmente, en el capítulo VI se realizan las recomendaciones pertinentes.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Características técnicas de la generación hidroeléctrica

La generación hidroeléctrica es una actividad del sector eléctrico, que utiliza recursos hidráulicos para producir electricidad (Decreto Ley N° 25844 1992). Así, la energía hidroeléctrica puede ser definida como la electricidad² obtenida a partir del uso del agua como fuente de energía primaria³ en centrales hidroeléctricas (Dammert et al. 2011).

En general, las centrales hidroeléctricas aprovechan la energía potencial gravitatoria⁴ que posee una masa de agua debido a un desnivel. La energía que se genera durante la caída del agua entre los dos niveles permite accionar el movimiento de una turbina hidráulica cuando el agua atraviesa esta máquina. Luego, la turbina hace girar el rotor de un generador eléctrico transformando finalmente esa energía en electricidad (Dammert et al. 2011, Gulliver y Arndt 1991).

Como se observa en la Figura 1, una central hidroeléctrica puede estar también compuesta por un embalse que es la acumulación de agua de forma natural o artificial producto de la obstrucción del cauce de un río mediante una represa (Dammert et al. 2011). Ésta permite regular el agua que pasa por la turbina, así como establecer un desnivel de agua determinado (ENDESA Educa 2016).

Desde la dimensión ambiental, es fundamental y obligatorio asegurar que el caudal del río equivalga, como mínimo, al caudal ecológico durante la operación de una CH (Ley N° 29338 2009, Serra 2015). Ello debido a que ese caudal representa “el volumen de agua que se debe mantener en las fuentes naturales de agua para la protección o conservación de los

² La electricidad es una energía secundaria, pues se produce a partir de la transformación de otras fuentes de energía primaria (combustible fósil, agua, sol, viento, etc.).

³ La energía primaria es toda aquella energía extraída de la naturaleza y que no ha sufrido algún tipo de transformación o conversión que no sea separación o limpieza, incluye: carbón, petróleo, gas natural, nuclear, hídrica, eólica, solar, geotermia, mareomotriz o biomasa (Tamayo et al. 2016).

⁴ Energía producto del efecto de la gravedad y está en función de la masa del cuerpo y la altura.

ecosistemas involucrados, la estética del paisaje u otros aspectos de interés científico o cultural” (Decreto Supremo N° 001-2010-AG 2010).

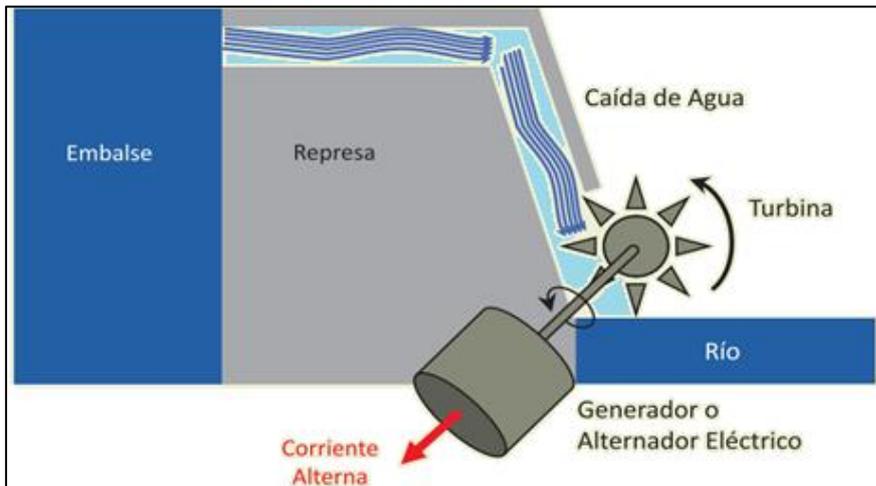


Figura 1: Esquema de funcionamiento de una central hidroeléctrica de embalse

FUENTE: Dammert et al. (2011).

La capacidad de generación hidroeléctrica depende de la potencia instalada y el tiempo de operación de la central hidroeléctrica (Gulliver y Arndt 1991, Halcrow y OIST 2011). Para poder cubrir los requerimientos de la demanda en todo momento se suele capacidad instalada que en algunos períodos no es plenamente utilizada (Dammert et al. 2012).

Asimismo, la potencia instalada depende en forma directa del desnivel y del caudal turbinado (Gulliver y Arndt 1991, Halcrow y OIST 2011, Osinergmin 2013). Las expresiones de energía (ENG) y potencia instalada (P) son las mostradas en la ecuación (1) y (2), respectivamente:

$$ENG = P \times L \quad (1)$$

Donde:

P: Potencia (KW)

L: Horas de trabajo (h)

$$P = CTUR \times G \times H \times EFI \times \rho \div 1000 \quad (2)$$

Donde:

CTUR: Caudal de agua turbinado (m³/s)

G: Gravedad, se consideró constante, equivale a 9.81 m/s²

H: Salto neto de la caída de agua

EFI: Rendimiento mixto de la turbina, generador y transformador (por ciento)

ρ : Densidad del agua

2.1.2. Características económicas de la generación hidroeléctrica

La cadena de valor de la industria eléctrica está conformada por tres segmentos físicos que proveen el servicio: la generación, la transmisión y la distribución de energía, y un segmento adicional de carácter comercial (Biggar y Hesamzadh 2014, Hunt 2002). Estos segmentos en conjunto constituyen una industria de redes (Tamayo et al. 2016). La actividad de generación hidroeléctrica se encuentra en el primer segmento; sin embargo, se considera importante iniciar con la descripción de un marco general sobre el sector eléctrico.

La generación se transforma energía primaria en energía eléctrica. Luego, en la transmisión se transporta esa energía desde los puntos de producción hasta las áreas de concesión de las empresas distribuidoras eléctricas. Posteriormente, estas empresas proveen el servicio de electricidad a los consumidores finales (MINEM 2018).

Al respecto, si se analiza la energía eléctrica en el segmento en que es adquirida por el consumidor (distribución), se le puede considerar como un bien privado porque su consumo reduce la disponibilidad de energía para el resto de consumidores (rivalidad) y es económicamente viable restringir el consumo a aquellos agentes que no han contribuido para su provisión (exclusión) mediante el corte de la conexión a la red de distribución (Abbott 2001, Pindyck y Rubinfeld 2009, Tamayo et al. 2016).

Sin embargo, si se le analiza considerando la seguridad del suministro de electricidad destinado al uso colectivo, adquiere características de bien público. Son diversos los autores que señalan que el suministro de electricidad, incluyendo la energía hidroeléctrica, es un servicio público que es indispensable para la forma de vida actual de la sociedad pues los beneficios derivados de su consumo (calefacción, iluminación, refrigeración, entre otros) garantizan un estándar de vida que permite el desarrollo de capacidades mínimas (Abbott 2001, Dammert et al. 2011, Jaén 2000, Tamayo et al. 2016).

Respecto al diseño del mercado eléctrico, históricamente han sido monopolios integrados verticalmente. Sin embargo, en las últimas décadas, han experimentado procesos de liberalización y desintegración de los segmentos (generación, transmisión y distribución), fomentando la introducción de nuevas compañías en aquellos sectores potencialmente

competitivos, así como la regulación en las actividades con características de monopolio natural (Joskow 2008).

Hunt (2002) señala que, generalmente, los segmentos de generación y comercialización presentan características de mercados competitivos; mientras que los segmentos de transmisión y distribución son monopolios naturales, y afirma que las operaciones de la cadena de valor de la industria eléctrica deben ser un monopolio para que el mercado funcione correctamente.

Luego de este marco general, se profundizará sobre el segmento de generación porque abarca la actividad de generación hidroeléctrica, objeto de estudio de la presente investigación. Este segmento, presenta economías de escala; sin embargo son pequeñas en relación al gran tamaño de la demanda de este mercado, por lo que las economías de escala se agotan rápidamente, promoviendo la competencia para satisfacer la demanda (Tamayo et al. 2016).

Por otro lado, la generación de electricidad es simultánea con la demanda, por ello existe la necesidad de mantener un equilibrio constante entre la oferta y la demanda (Tamayo et al. 2016, Jaén 2000). Ante ello la flexibilidad de las centrales eléctricas es una herramienta vital para gestionar la variabilidad de la demanda (Tamayo et al. 2016).

Así, existe una gran variedad de tecnologías y fuentes de energía primaria para la generación de electricidad, cada uno con costos fijos y variables distintos (Jaén 2000). Los costos fijos corresponden a la construcción de la infraestructura, mientras que los costos variables se producen en el momento en que se inicia la producción, cuyo valor depende, básicamente, de la fuente de energía primaria que se utiliza (Jaén 2000).

Las centrales hidroeléctricas presentan una alta flexibilidad y bajos costos variables en comparación a otras tecnologías; sin embargo se requiere una alta inversión para su construcción y puesta en funcionamiento inicial (Biggar y Hesamzadh 2014, Pennsylvania State University 2015). Los bajos costos de operación las centrales hidroeléctricas se explica porque no requieren combustibles, sino que usan una forma renovable de energía, que es reemplazada constantemente por la naturaleza (Gulliver y Arndt 1991).

La variabilidad temporal y aleatoria de la oferta y demanda, la incapacidad de almacenamiento de la electricidad y la existencia de múltiples tecnologías con diferentes estructuras de costos, justifican la existencia de un operador que coordine y asigne la

producción de las distintas centrales de generación para abastecer la demanda de forma sostenible priorizando aquellas con menores costos variables y mayor eficiencia productiva (Tamayo et al. 2016).

2.1.3. Servicios ecosistémicos del bosque en la producción de energía hidroeléctrica

La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA 2005) define a los servicios ecosistémicos como:

[...] los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas. Estos incluyen servicios de provisión como alimentos y agua; servicios de regulación como la regulación de inundaciones, sequías, degradación de tierras y enfermedades; servicios de soporte tales como formación de suelos y ciclos de nutrientes; y servicios culturales como recreación, beneficios espirituales, religiosos y otros no materiales.

Asimismo, la Ley N° 30215 sobre los Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos, aprobó en 2014 la siguiente definición nacional sobre servicios ecosistémicos: beneficios económicos, sociales y ambientales, directos e indirectos, que las personas obtienen del buen funcionamiento de los ecosistemas. La conservación y el aprovechamiento sostenible de los servicios ecosistémicos son fundamentales para un desarrollo sostenible y el bienestar y la salud de las personas (MEA 2005, MINAM 2016).

Respecto a la generación hidroeléctrica, su actividad depende de la provisión del agua. Adicionalmente, diversos estudios han identificado que el bosque le aporta principalmente los servicios ecosistémicos de la regulación hídrica y el control de sedimentos (Bruijnzeel 2011, Atlason y Unnthorsson 2014, Chen et al. 2015; Sáenz et al. 2014; Stickler et al. 2013, Turconi et al. 2013).

La regulación hídrica es la capacidad que tienen los suelos y cobertura vegetal para promover la infiltración y, por ende, retardar el paso natural del agua por la cuenca; así los bosques promueven un flujo uniforme estacional y anual, particularmente en la estación seca (MEA 2005). Al respecto, la FAO (2008) en la publicación *“Forest and water: A thematic study in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005”* señala que la eliminación parcial o completa de la cobertura forestal aumenta la cantidad total de agua en las corrientes que fluyen desde el área de captación, exceptuando el caso de los bosques nubosos.

El control de sedimentos está relacionado a la regulación de la erosión donde la cobertura vegetal juega un papel importante en la retención del suelo y la prevención de deslizamientos de tierra. Las asociaciones vegetales reducen el desprendimiento del suelo mediante su sistema radicular y la cobertura de su dosel (MEA 2005).

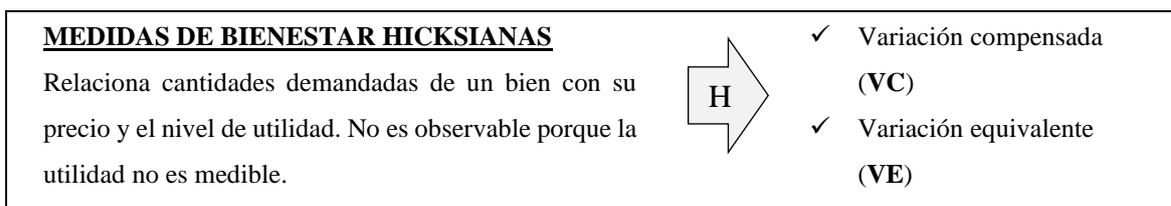
Al respecto, MEA (2005) señala que los servicios de protección de agua y suelo de los bosques dependen de manera crítica del área y la distribución espacial de los bosques sobre los paisajes. En ese sentido, el momento y la magnitud de la escorrentía, las inundaciones, los sedimentos y la recarga de los acuíferos pueden verse fuertemente influenciados por los cambios en la cobertura del suelo, incluidas, en particular, aquellas que cambian el potencial de almacenamiento de agua del sistema, como la deforestación.

Entre los principales impactos biofísicos que se espera de estos dos servicios ecosistémicos de regulación, encontramos: reducción de caudales máximos, mantenimiento de caudales mínimos (caudal base), reducción del ritmo de colmatación del embalse de la central hidroeléctrica, reducción del impacto de partículas sólidas en la infraestructura y mantenimiento del volumen total de agua en la cuenca (CONDESAN et al. 2015, Guo et al. 2000, Cordero et al. 2006).

Lo señalado en el párrafo anterior tiene un impacto directo en el volumen total de agua disponible para la generación de energía hidroeléctrica, principalmente en el agua disponible en el embalse por la reducción de la velocidad de colmatación de los sedimentos en la referida infraestructura.

2.1.4. Medidas de bienestar

Son aquellas medidas que permiten cuantificar los efectos generados por cambios en los precios o en las cantidades de un bien o servicio ecosistémico sobre el bienestar de las personas o la sociedad (MINAM 2015). De acuerdo con la teoría económica, estos efectos en el bienestar se pueden estimar a través de medidas de bienestar hicksianas y marshallianas, de acuerdo con lo mostrado en la Figura 2.



< continuación >

<p><u>MEDIDAS DE BIENESTAR MARSHALLIANAS</u></p> <p>Posee argumentos observables, precios y nivel de ingreso, de manera que su estimación es relativamente sencilla.</p>		<ul style="list-style-type: none">✓ Excedente del consumidor (EC)✓ Excedente del productor (EP)
---	---	--

Figura 2: Medidas de bienestar

FUENTE: Adaptado de MINAM (2015) y Varian (2011).

Dado el objetivo de la investigación se profundizará sobre las medidas de bienestar del productor. Varian (2011) señala que el excedente del productor es el área situada encima de la curva de la oferta y por debajo de la recta del precio al cual el productor ofrece el bien o servicio (x). En la Figura 3 se observa la variación del excedente del productor cuando el precio varía, ya sea de p' a p'' o viceversa, la cual corresponde al área sombreada en la referida figura.

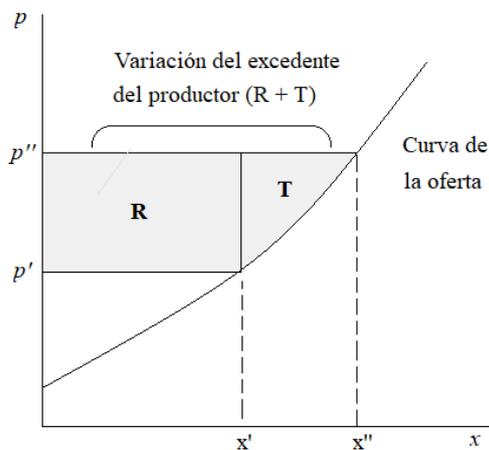


Figura 3: Variación del excedente del productor

FUENTE: Adaptado de Varian (2011).

El excedente del productor por cambios en los precios de venta es la medida de bienestar que se encuentra con mayor frecuencia en la literatura; sin embargo, existen también otras medidas de bienestar del productor relacionadas a los cambios en la cantidad y calidad ofertada del bien de mercado (Freeman et al. 2014).

Freeman y Harrington (1990) derivaron medidas de bienestar para cambios en algún factor de la función de producción de las empresas, pudiendo ser este factor la calidad del ambiente o la disponibilidad de recursos para la producción. Así identificaron dos medidas alternativas

de cambio de bienestar para empresas de un solo producto: (1) La derivada de la función de producción valorada al precio de mercado y (2) la función de costo agregado.

En la primera medida, la ganancia neta de bienestar de un aumento de la cantidad del bien o servicio ecosistémico es el valor del producto marginal del bien o servicio ecosistémico en la función de producción, es decir el aumento en la cantidad del bien producido que ocurriría si se mantienen constantes todos los demás factores de producción. Para su aplicación se requiere conocimiento de la función de producción para implementar esta medida (Freeman y Harrington 1990, Freeman et al. 2014).

En la segunda medida, la dualidad de la función de costo y de producción asegura que las dos medidas de la variación marginal de bienestar sean equivalentes. La Figura 4 muestra la variación de la medida de bienestar (b+d) cuando las curvas del costo marginal $C(x, Q)$ de la producción del bien de mercado x varía debido a cambios en el factor Q que representa la calidad del ambiente o la disponibilidad de recursos (Freeman y Harrington 1990, Freeman et al. 2014).

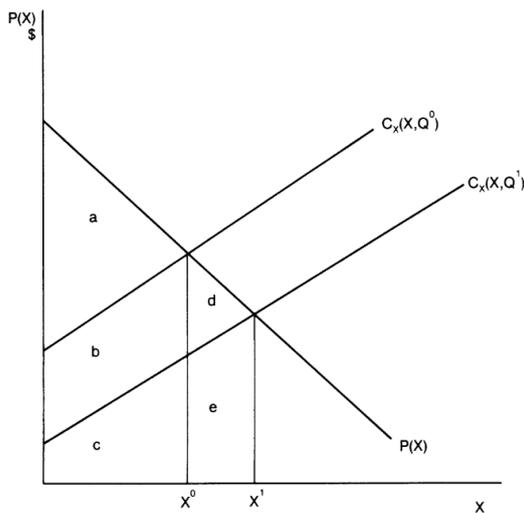


Figura 4: Variación de la medida de bienestar de un productor de un solo producto a partir de la función de costo agregado.

FUENTE: Freeman y Harrington (1990).

Freeman et al. (2014) señalan que la elección entre la medida de bienestar basada sobre la función de producción o de costos depende básicamente de la disponibilidad de datos; sin embargo, Bishop (1998) señala que esta última debe ser utilizada con reserva porque no mide directamente la disponibilidad a pagar por los bienes o servicios ecosistémicos obteniéndose resultados sobre o subestimados en su aplicación.

2.1.5. Valoración económica de servicios ecosistémicos

La valoración económica es una herramienta que busca medir el valor de los servicios ecosistémicos en términos monetarios, a fin de proporcionar una métrica común para expresar los beneficios proporcionados los ecosistemas, independientemente de si cuentan o no con un precio o mercado (Pearce 1993).

Esta herramienta se basa en que las personas obtienen beneficios (utilidad) del uso de los bienes y servicios ecosistémicos, ya sea directa o indirectamente, en el presente o futuro, por lo que están dispuestas a realizar intercambios a fin de mantener la combinación que les genera mayor satisfacción (Dupuit 1844, Marshall y Marshall 1879).

En ese sentido, los bienes y servicios ecosistémicos pueden tener distintos tipos de valor para cada individuo. El Manual de valoración económica del patrimonio natural del MINAM homogeniza el enfoque del valor económico total, señalando que el mismo comprende el valor de uso y el valor de no uso. El valor de uso está constituido por el valor de uso directo y el valor de uso indirecto; mientras que el valor de no uso comprende el valor de existencia y el valor de legado (MINAM 2015).

Estos distintos valores se pueden aislar para su análisis y luego sumarse para la determinación del valor total del bien o servicio ecosistémico (MINAM 2015). Al respecto, dado el objetivo de la presente investigación se determinará el valor de uso indirecto del bosque húmedo de la cuenca del río Gera.

El referido Manual (MINAM 2015) clasifica los métodos de valoración en métodos basados en valores de mercado, y en preferencias reveladas y declaradas:

- El método basado en valores de mercado utiliza información de mercado para la estimación de los valores económicos de servicios ecosistémicos.
- Los métodos basados en preferencias reveladas analizan a través del estudio del comportamiento de las personas en los mercados, sus preferencias por un servicio ecosistémico. Incluye los métodos: cambio en la productividad, costo de viaje, precios hedónicos y costos evitados.
- Los métodos directos, o de preferencias declaradas, intentan valorar económicamente los servicios ecosistémicos al obtener información de los agentes demandantes en un mercado hipotético. Incluye, los métodos de valoración contingente y experimentos de elección.

a. Cambios en la productividad

Permite estimar el valor de uso indirecto de un servicio ecosistémico a través de su contribución a las actividades de mercado (MINAM 2015). Este método se basa en la teoría de la función de producción, donde el servicio ecosistémico es un insumo en el proceso de producción, así un cambio en el bien o servicio ecosistémico implicará una variación en la producción del bien de mercado, lo que afectará el bienestar de las personas o sociedad (MINAM 2016). Los supuestos que involucra son los siguientes:

- El bien o servicio ecosistémico por valorar debe constituir un insumo o factor relevante de la producción de un bien que cuente con mercado y,
- El precio del bien de mercado debe ser conocido o inferible.

El Manual de valoración económica del patrimonio natural (MINAM 2015) señala que la aplicación de ese método puede dividirse en dos etapas: (1) la determinación del efecto físico donde se establece la relación entre el bien o servicio ecosistémico y la producción de un bien en el mercado y (2) la estimación monetaria o cálculo del valor económico del servicio ecosistémico en estudio.

Respecto a la primera etapa, el MEA (2005) señala que es importante rastrear los impactos biofísicos de los cambios en la condición del ecosistema a través de cadenas de causalidad para que pueda relacionarse con las medidas de bienestar.

2.1.6. Función de producción de la energía hidroeléctrica

La función de producción se define como la relación de la producción (Q) y sus factores, que mide la cantidad máxima de producción que puede obtenerse con una cantidad dada de factores (Nicholson 2004, Varian 2011, Frisch 1965).

Nicholson (2004) señala que, por convención, se suelen utilizar las combinaciones de capital (K) y trabajo (L) para determinar la función de producción; pero no descarta la posibilidad de usar otros factores como el de materias primas (M). Asimismo, Varian (2011) precisa que el concepto de función de producción también puede utilizarse cuando hay varios factores.

Respecto a los servicios ecosistémicos, Freeman y Harrington (1990), Freeman et al. (2014) y el Manual de valoración económica del patrimonio natural del MINAM (2015) coinciden en que un servicio ecosistémico (A) puede ser considerado como un factor de producción de un bien específico, generando la siguiente forma funcional de una función de producción:

$$Q = f(K, L, A) \quad (3)$$

En cuanto a la actividad de generación hidroeléctrica, Edwards (2003) y Førsund (2005, 2015) desarrollaron funciones de producción específicas aplicables a esa actividad, considerando las diferentes características de su operación como presencia o ausencia de embalse, operación alternada con otras fuentes primarias renovables y no renovables, entre otras.

Førsund (2015), señala que una cuestión económica fundamental en la producción de la energía hidroeléctrica por CH con embalse es la variación temporal del consumo del agua almacenada en el embalse dada la capacidad de producción para cada período de tiempo. Por lo tanto, el análisis de la producción de este tipo de CH es esencialmente dinámico (valores discretos de tiempo) y con variables de flujo y stock. Proponiendo la siguiente función de producción⁵:

$$ENG_t = f_t(r_t, H_t), f'_t > 0, f'_{H_t} > 0 \quad (4)$$

Donde ENG es la energía hidroeléctrica producida en el tiempo t expresado en MWh; r_t es el volumen de agua liberada desde el embalse para la producción de energía durante el período de tiempo t expresado en m^3 (r/t , cuando t es expresado en segundos corresponde al caudal turbinado CTUR); y H_t es la altura o salto bruto de caída del agua⁶ expresado en m. Si la CH es de pasada, r_t es equivalente al volumen de agua de ingreso aportado por el río.

La variable H_t es determinada por la orografía de la zona y la infraestructura de la CH, por lo que la función de producción puede ser simplificada a la siguiente forma:

$$ENG_t \leq \frac{1}{a} r_t \quad (5)$$

Donde a es el coeficiente de fabricación, que representa el volumen de agua (m^3) necesario para producir una unidad de energía hidroeléctrica (MWh) (Frisch 1965)⁷, el mismo que refleja la tecnología incorporada de los túneles y turbinas de alimentación de la CH, y el

⁵ Es evidente la relación de esta función con la expresión de ingeniería para determinar la potencia de una CH mostrada en la ecuación (2) de este documento.

⁶ En Perú, la altura o salto bruto de una central hidroeléctrica es la energía hidráulica por unidad de peso disponible entre el nivel superior de agua en la cámara de carga y el nivel de agua en la estructura de descarga de aguas turbinadas (Osinermin, 2013).

⁷ El valor de $1/a$ es denominado coeficiente de producción en la literatura de ingeniería (Goor et al. 2016).

diseño de ingeniería de liberación óptima de agua en las turbinas. Al respecto, las turbinas representan una tecnología bastante madura, por lo que actualmente las mejoras tecnológicas son puntuales y bastante lentas (Førsund 2015).

Esta forma no incluye el capital ni otros factores como la mano de obra e insumos, al no considerarlos relevantes en relación al rol que desempeña el agua como factor de producción de la energía hidroeléctrica (Førsund 2015). El papel del capital es proporcionar una capacidad para producir energía hidroeléctrica; por lo tanto, es suprimido porque la potencia de la CH (MW) ya establece el límite superior al que puede llegar la producción de energía hidroeléctrica (MWh), siendo finalmente definida la producción por el flujo máximo de agua de la tubería de alimentación, la capacidad de la turbina o la capacidad de transmisión desde la planta.

La relación entre la producción de energía hidroeléctrica durante un período y la capacidad de potencia se puede interpretar como el número de horas durante el período en que se ha utilizado la capacidad de potencia total, esto se denomina horas de carga completa y caracteriza la utilización de la capacidad de potencia⁸ (Tamayo et al. 2016, Dammert et al. 2011, Førsund 2015).

Dado que las capacidades están presentes y son fijas, solo los costos variables deberían influir en las operaciones actuales. Sin embargo, el modelo propuesto por Førsund (2015) tampoco los incluye porque considera que son insignificantes ya que las personas se emplean para supervisar los procesos de la CH y su cantidad no variará con la cantidad de energía hidroeléctrica producida. En tanto que el mantenimiento está principalmente en función del tamaño de la estructura de capital y no del nivel de producción de la CH.

El modelo, por su nivel de agregación, no considera la variación de la eficiencia de conversión de energía potencial a energía eléctrica por las variaciones de la altura del embalse, las variaciones de stock de agua en el embalse, pérdidas del agua de ingreso como fugas durante el traslado del agua hacia las turbinas y la evaporación o desbordamiento en el embalse.

⁸ Una medida relativa basada en la proporción de horas de carga completa puede llamarse un factor de capacidad.

Asimismo, el modelo básico de Førsund (2015) asume que solo hay flujo de entrada en el primer período, y además supone que la producción de electricidad es eficiente⁹, es decir, una igualdad en la función de producción (ecuación (5)). Finalmente, considera que existe una transferibilidad ilimitada del agua a los otros períodos de la cantidad total de agua disponible después del primer período. Es decir, la suma del agua turbinada debe ser igual al agua que ingresa en el periodo respectivo (W). Al usar la función de producción (ecuación (5)) se obtiene:

$$\sum_{t=1}^T r_t = W_1 \Rightarrow \sum_{t=1}^T ENG_t = \frac{w_1}{a} \quad (6)$$

En la generación hidroeléctrica existen muchas restricciones sobre cómo operar una CH con embalse, la relevancia de las restricciones varía en cierta medida con la duración del período elegido para el modelo, desde el más agregado (semestral: época seca y húmeda) hasta el más específico (horario). La relevancia de las restricciones también depende de si se adoptan modelos de plantas simples o múltiples.

2.1.7. Mercado de la generación eléctrica en el Perú

De acuerdo al artículo 2 del Decreto Ley N° 25844, Ley de Concesiones Eléctricas, en Perú la electricidad es un servicio público constituido por el suministro regular de energía eléctrica para uso colectivo o destinado al uso colectivo, y la transmisión y distribución de electricidad.

Al respecto, la oferta de electricidad es separada en tres actividades independientes: generación, transmisión y distribución, y se permite la participación del sector privado en estas actividades comerciales (Decreto Ley N° 25844). La generación se considera potencialmente competitiva, mientras que las otras se consideran monopolios naturales (Tamayo et al. 2016). Sin perjuicio de ello, el segmento de generación puede presentar fallas como la concentración del mercado (Bonifaz 2001).

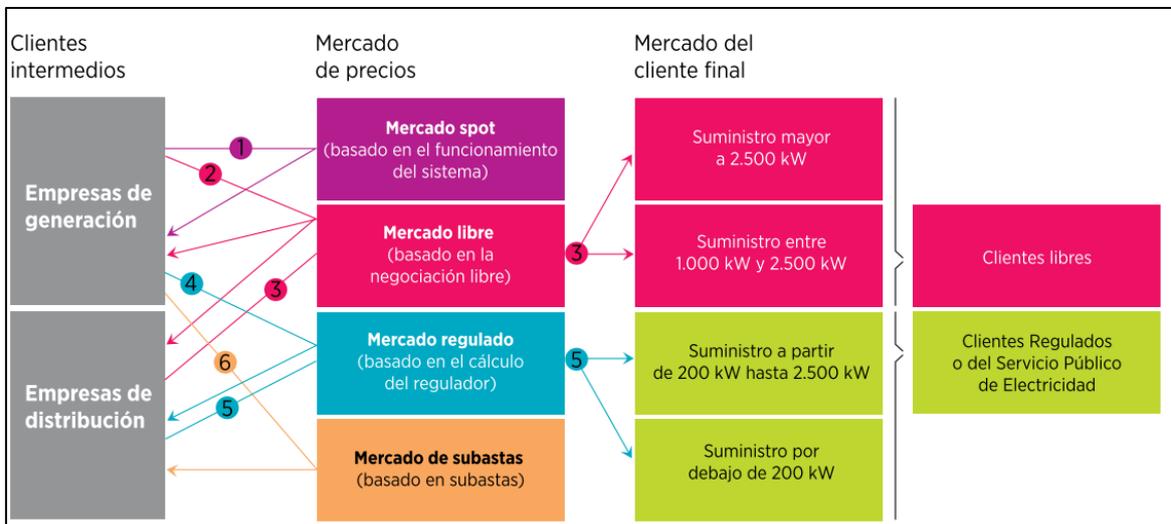
El MINEM es el sector competente del mercado eléctrico peruano, el mismo que se encuentra conformado por el OSINERGMIN que es organismo regulador, el COES que es

⁹ Lo que es válido en nuestro país pues de acuerdo a la dinámica del mercado Spot el ingreso de la energía hidroeléctrica tiene prioridad sobre otras energías debido a sus bajos costos marginales (DGE, 2012; Tamayo et al., 2016).

la entidad privada que gestiona la red nacional, y las empresas públicas y privadas que se dedican a la generación, transmisión y distribución (IRENA 2014).

El consumo del mercado eléctrico se realiza a través del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) y los Sistemas Aislados. Respecto a los usuarios, estos pueden ser libres o regulados de acuerdo a la cantidad de potencia que demanden (200 kW es la potencia a partir de la cual un usuario entra al mercado libre) (Decreto Ley N° 25844).

En cuanto a los precios, el mercado se compone de cuatro unidades: el mercado spot, el mercado libre, el mercado regulado y el mercado de subastas (DGE 2012). La Figura 5 muestra la interacción entre estas cuatro unidades.



Nota: (1) Transacciones de energía y potencia entre generadores, a precio spot. (2) Venta intermedia de electricidad de generadoras a distribuidoras a precios libre. También existen casos de venta intermedia de electricidad entre generadoras, a precio libre. (3) Venta final de electricidad de distribuidoras a clientes libres finales, a precio libre. (4) Venta intermedia de electricidad de generadoras a distribuidoras, a precios regulado. (5) Venta final de electricidad de distribuidoras a clientes regulados finales, a precio regulado. (6) Venta intermedia de electricidad de generadoras a distribuidoras, a precio establecido por subasta. Está previamente determinado que el objeto de la subasta es obtener contratos de energía y potencia para abastecer a los clientes regulados finales.

Figura 5: Dinámica del mercado eléctrico peruano

FUENTE: DGE (2012); IRENA (2014).

En el mercado *spot* se acepta que los precios de electricidad sean equivalentes a los valores de costo marginal del sistema, los cuales varían cada 15 minutos como resultado de la operación de despacho económico del SEIN. En la práctica, el despacho económico de los generadores se realiza en orden creciente de costos, así el costo marginal se define como el

costo variable de la unidad generadora más costosa que se encuentra operando para abastecer la demanda en un instante determinado (Tamayo et al. 2016).

En el mercado libre, por acuerdo de las partes, los precios y condiciones de suministro se negocian libremente. Por su lado, en el mercado regulado, por acuerdo de las partes, se aceptan los precios determinados por el regulador OSINERGMIN, así como las condiciones de suministro establecidas en la norma respectiva. Finalmente, en el mercado de Subastas se establecen los precios de compra y venta de electricidad por medio de subastas (DGE 2012, IRENA 2014).

Estos mercados coexisten e interactúan generando un impacto directo en la demanda agregada de los usuarios. En el corto plazo se genera una demanda instantánea que COES busca abastecer en función a la eficiencia de su producción. Sin embargo, a largo plazo esta demanda se mantiene a un precio constante debido a la regulación del sector y a la potencia instalada en el segmento de generación (Tamayo et al. 2016).

2.2. ANTECEDENTES

San Martín es una de las regiones que mayor impulso ha dado a la gestión ambiental en Perú, lo que se denota en que cuatro de las 17 iniciativas de MERESE de regulación hídrica del país se han concretado en esta región: (1) Microcuenca del Cumbaza. (2) Cuenca del Gera (Madre Gera), (3) Microcuencas de Rumiyacu, Mishiyacu y Almendra y (4) Cuenca de Yuracyacu (MINAM s.f., Quintero y Pareja 2015).

Madre Gera forma parte de las iniciativas de la Incubadora de Mecanismos Retribución de Servicios Ecosistémicos (IMRSE), establecida en 2012 por el MINAM y *Forest Trends* (MINAM, s.f.). Aunque, Madre Gera inició en 2009 promocionada principalmente por la asociación civil sin fines de lucro denominada Amazónicos por la Amazonía (AMPA). Es pertinente señalar que la CH Gera se encuentra en el área de influencia de esta iniciativa.

En esta iniciativa, al 2015, se habían firmado 27 acuerdos de conservación que involucran un área de 6 km² entre el Comité de Gestión (Retribuyente) y representante de la unidad familiar/ comunidad (contribuyente), financiados principalmente por fondos de cooperación. Asimismo, se identificó a ELOR, operador de la CH Gera, como un retribuyente que debía ser priorizado e integrado al Comité de Gestión (Quintero y Pareja 2015).

En 2016, representantes de *Forest Trends*, AMPA y CONDESAN iniciaron un estudio para evaluar los beneficios económicos que brinda la cuenca del río Gera a la CH Gera, a partir de los diferentes estudios realizados en esta zona (Rojas 2014a, Rojas 2014b, Vilca 2015a, Vilca 2015b, Salgado 2013, CONDESAN et al. 2015, Diaz 2013) y datos proporcionados por ELOR (ELOR 2008, ELOR 2016a, ELOR 2016b; Hidroconsult E.I.R.L. 2008, entre otros). Como parte del señalado estudio, se realizó un análisis de cuencas pares¹⁰.

A partir de la metodología de cuencas pares, las entidades señalada identificaron una relación directa entre el porcentaje de superficie de bosque y los caudales promedio específicos. Con cierto grado de incertidumbre, determinaron que una pérdida de alrededor del 10 por ciento del área de la cobertura forestal en la cuenca, presume una reducción de la producción hídrica de un 15 por ciento, lo que por consiguiente llevaría a un incremento en 25 por ciento de los días con caudales promedio por debajo del umbral de caudal óptimo de operación de la CH Gera (CONDESAN et al. 2015, Gammie et al 2016).

Lo señalado adquiere especial relevancia considerando la alta deforestación de la zona, la importancia de la CH Gera en la provisión de energía eléctrica en la región San Martín, así como la pérdida de la capacidad del embalse de la CH Gera que, desde su construcción, ha pasado de tener un volumen disponible de 207,900.00 m³ en 1992 a 63,000.00 m³ en 2015, operando a un 60 por ciento de su capacidad (ELOR 2008, 2016b).

La introducción del área de la cobertura forestal como un factor de la producción de energía hidroeléctrica ha sido discutida en diversos estudios, considerando principalmente a dos servicios ecosistémicos: la regulación hidrológica y el control de sedimentos (Bruijnzeel 2004). Probablemente, Barrow et al. (1986) realizaron el primer estudio relacionado a la temática al analizar el efecto de la reforestación en la producción de energía hidroeléctrica.

Por un lado, respecto a la relación entre el bosque y el agua disponible para producir energía hidroeléctrica, se suele considerar que el área de la cobertura forestal tiene un impacto directo en la cantidad y calidad del agua disponible en la cuenca hidrográfica; sin embargo, el único consenso científico es que el efecto neto de un incremento en el área de la cobertura

¹⁰ La Guía metodológica para el monitoreo hidrológico de ecosistemas andinos – Iniciativa MHEA (Célleri et al. 2012) define el análisis de cuencas pares como la comparación de la respuesta hidrológica de dos microcuencas de tamaño pequeño, con tamaño, topografía, suelos y clima lo más similares posible, dejando a la cobertura o uso de la tierra como la única diferencia significativa entre ambas; de esta manera las diferencias encontradas entre los caudales (en caso de encontrarse diferencias) pueden ser atribuidas a ello. Así, una microcuenca es usada como testigo y la otra es aquella de la cual se quiere evaluar la acción.

forestal sobre los caudales producidos en la época de estiaje depende del balance entre el aumento de caudal debido a la mejora en la recarga hídrica en el suelo¹¹ y la disminución de las reservas de agua en el suelo y el caudal ocasionadas por el mayor consumo de agua por los árboles (Bruijnzeel 2004, Sáenz y Mulligan 2013, Zimmermann et al. 2010).

Por otro lado, respecto a la relación de la cobertura del bosque y la regulación de sedimentos en la actividad de generación hidroeléctrica, la cobertura forestal reduce la concentración de sedimentos en el agua a turbinar y embalse, por lo que reduciría los daños en la maquinaria por el impacto de las partículas sobre su superficie (Sáenz et al. 2014, Aylward 2004).

En general, los estudios realizados por Sáenz et al. (2014), Bernard, De Groot y Campos (2009), Guo et al. (2007), y Reyes et al. (2002) han identificado que la conservación del bosque presenta ventajas para la sostenibilidad de la operación de las CH. Al respecto, la Tabla 1 muestra un resumen de los referidos estudios.

Tabla 1: Resumen de estudios sobre la valoración de los servicios ecosistémicos del bosque respecto a la producción de energía hidroeléctrica.

Estudio	Datos de la CH y bosque	Servicios ecosistémicos que provee a la CH	Valor (USD/ha/año)
<i>The role of cloud forest restoration on energy security</i> (Sáenz et al. 2014)	CH Calima con represa, Colombia. Bosque nublado	Analizó los servicios ecosistémicos de provisión de agua y regulación de caudal y sedimentos respecto a la reforestación de 18,000 ha ² encontrando que el bosque genera: Incremento del 12 por ciento del agua disponible Incremento del 5.9 por ciento del agua que ingresa a la represa. Reducción del 33.3 por ciento de los sedimentos que ingresan a la represa.	305 a 365 USD/ha/año Dependiendo si es un año normal o seco, respectivamente.
<i>Valuation of tropical forest services and mechanisms to finance their</i>	Tres CH: Rio Macho, Cachí y Angostura, Costa Rica	Analizó el servicio ecosistémico de control de sedimentos, comparando los sedimentos que llegan a la CH Cachí y CH Angostura en comparación a la CH Rio Macho,	43 USD/ha/año Es un valor agregado de disposición de agua para consumo humano de agua

¹¹ La reforestación generalmente incrementa la porosidad del suelo y por defecto la infiltración, así que permite que mayor cantidad de agua se filtre hacia el agua el subsuelo (Zimmermann et al. 2010).

< continuación >

Estudio	Datos de la CH y bosque	Servicios ecosistémicos que provee a la CH	Valor (USD/ha/año)
<i>conservation and sustainable use: A case study of Tapantí National Park, Costa Rica</i> (Bernard et al. 2009)	Bosque húmedo premontano, bosque pluvial premontano, bosque pluvial de baja montaña, bosque pluvial montañoso, Páramo pluvial subalpino	tienen áreas deforestadas en comparación a la última. Al respecto, la CH Rio Macho no presenta problemas con sedimentos, lo que representa al menos 1,646,143 USD/año de costos evitados.	(3.47), sedimentos evitados en las CHs (28.62) y turismo (10.88).
<i>Hydroelectricity Production and Forest Conservation in Watersheds</i> (Guo et al. 2007)	CH Tres Gargantas ubicada en el tramo superior del río Yangtze, China	Evalúo la regulación del flujo del agua del río y la retención de sedimentos por año. En época seca, el incremento de 1 m ³ del flujo de agua puede incrementar 0.3 KWh de la producción de energía hidroeléctrica.	80 USD/ha/año
<i>Valuation of hydrological services provided by forests in Costa Rica</i> (Reyes et al. 2002)	Evalúo la viabilidad de establecer nuevas CH para los cuatro ríos en Costa Rica: Peñas Blancas, Reventazón, Savegre y Pejibaye. No específica, aunque menciona condiciones nubosas y tropicales	Se evaluó costos de sustitución y mantenimiento en CH en función a los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica de los bosques de las cuatro cuencas en estudio, incluyendo: aumento o disminución de la escorrentía, regulación del flujo y el mantenimiento de la calidad del agua. Se encontró que un aumento del uno por ciento de la cubierta forestal implica una disminución menor en la escorrentía (0.07 por ciento). Utilizó valor presente neto con una tasa de descuento del 9.8 por ciento.	100 USD/ha/año para bosque de la cuenca de Peñas Blancas 133 USD/ha/año para bosque de la cuenca de Reventazón 138 USD/ha/año para bosque de la cuenca de Savegre 179 USD/ha/año para bosque de la cuenca de Pejibaye- *Valores agregados para consumo de agua y producción de energía hidroeléctrica.

FUENTE: Sáenz *et al.* (2014a), Bernard *et al.* (2009), Guo *et al.* (2007) y Reyes *et al.* (2002).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. HIPÓTESIS

3.1.1. Hipótesis general

La superficie de la cobertura forestal del bosque húmedo de la cuenca del río Gera genera un impacto económico positivo en la producción de la energía hidroeléctrica por la CH Gera ubicada en Moyobamba, Perú.

3.1.2. Hipótesis específicas

- a. La superficie de la cobertura forestal del bosque húmedo de la cuenca del río Gera, a través de los servicios ecosistémicos de regulación hídrica y control de sedimentos, presenta un impacto físico en la producción de la energía hidroeléctrica.
- b. La superficie de la cobertura forestal del bosque húmedo de la cuenca del río Gera es un factor de producción de la energía hidroeléctrica por la CH Gera.
- c. El bosque húmedo de la cuenca del río Gera posee un valor económico respecto a los cambios en la productividad marginal de la energía hidroeléctrica por la CH Gera.

3.2. METODOLOGÍA

3.2.1. Tipo de investigación

La investigación fue de carácter descriptiva, exploratoria y de correlación. Es descriptiva porque presenta la relación de los servicios ecosistémicos del bosque con la producción de la energía hidroeléctrica, enfocándose en la regulación hídrica y el control de sedimentos del bosque de la cuenca Gera; es exploratoria ya que se determinan los factores relevantes de la producción de energía hidroeléctrica por la CH Gera; y, es correlacional porque se relaciona la cobertura forestal y la cantidad de energía hidroeléctrica producida.

3.2.2. Área de estudio

La investigación relaciona la operación de la CH Gera con la superficie del bosque de la cuenca del río Gera, por ello se considera necesario describir las características relevantes de ambas unidades de estudio:

a. Central Hidroeléctrica Gera (CH Gera)

Se ubica a 900 m.s.n.m. en la cuenca hidrográfica del río Gera, distrito de Jepelacio, provincia de Moyobamba y departamento de San Martín, conforme a lo mostrado en la Figura 6. La CH Gera es administrada por ELOR y pertenece al SEIN; asimismo, la Tabla 2 muestra sus principales características técnicas.

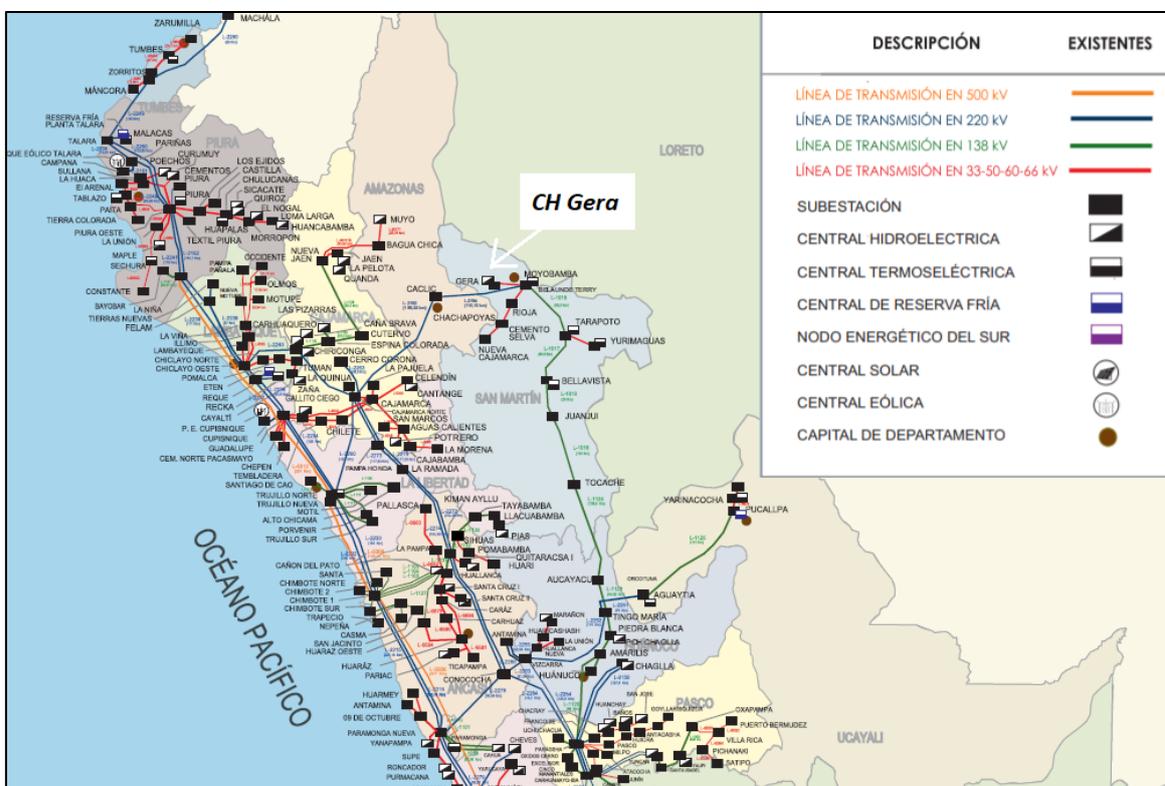


Figura 6: Ubicación y conexión al SEIN de la CH Gera.

FUENTE: COES (2019b)

La CH Gera fue puesta en servicio en 1992 con dos grupos de generación en paralelo (Gera I) y posteriormente en 2009 se instaló un grupo de generación adicional (Gera II), en la Figura 7 se muestra un diagrama simplificado de la operación de la CH. Asimismo, el Anexo 1 se muestra un esquema gráfico simplificado de la operación de la unidad de generación Gera I de la CH Gera y el Anexo 2 muestra las características técnicas de las turbinas, generadores y transformadores de ambos grupos de generación.

Tabla 2: Características técnicas de la CH Gera

Factor	Valor
Potencia efectiva (MW)	8.25
Potencia efectiva de Gera I (MW)	6
Potencia efectiva de Gera II (MW)	0.18
Grupos de generación	3
Salto bruto (m)	183
Salto neto (m)	163
Caudal de diseño (m ³ /s)	4.30
Sistema de aducción	Canal abierto
Caudal ecológico (m ³ /s)	0.74
Caudal mínimo por un periodo menor a 24 h (m ³ /s)	0.18

FUENTE: Osinergmin (2011) y ELOR (2005).

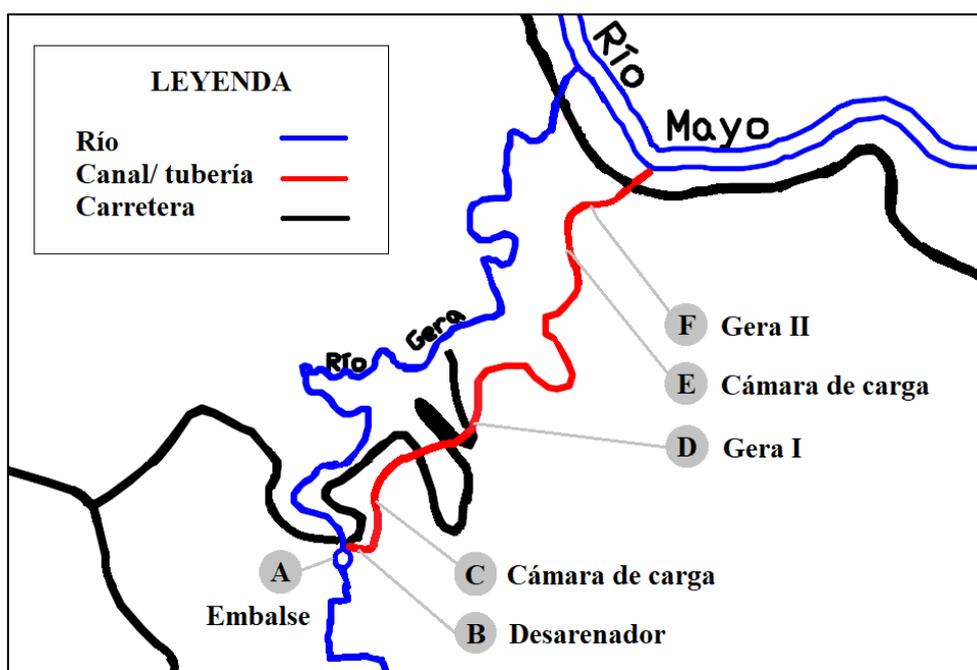


Figura 7: Diagrama de la operación de la CH Gera.

FUENTE: Adaptado de ELOR (2005).

b. Cuenca hidrográfica del río Gera

La cuenca hidrográfica del río Gera está ubicada en el departamento San Martín, específicamente dentro del distrito Jepelacio de la provincia de Moyobamba y el distrito San Martín de la provincia de El Dorado. La Figura 8 muestra la distribución y dimensión de la cuenca del río Gera, así como la ubicación de la CH Gera en la referida cuenca.

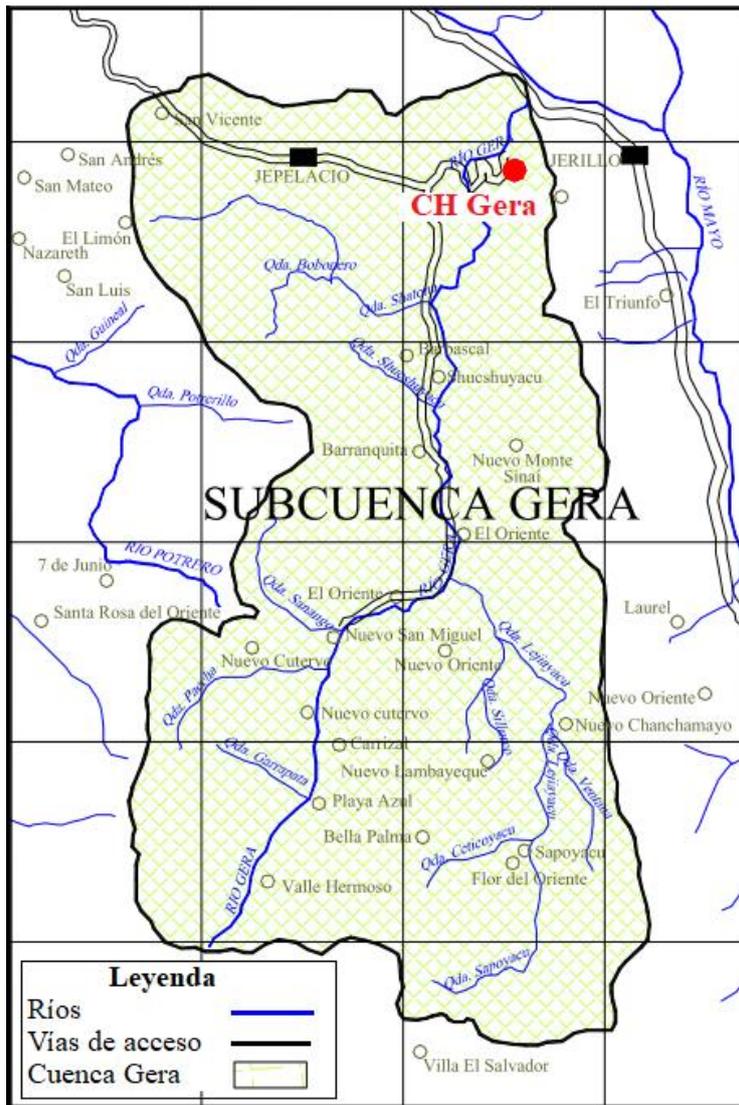


Figura 8: Distribución de la cuenca del río Gera y ubicación de la CH Gera.

FUENTE: Adaptado de ELOR (2005).

La precipitación promedio mensual de la cuenca varía entre 53.44 y 205.89 mm, donde el período húmedo se registra de octubre a diciembre pudiendo prolongarse hasta marzo, y el período seco (estiaje) entre abril y agosto. Su suelo es Leptosol éútrico-Cambisol éútrico-Regosol éútrico y se encuentra en una zona de bosque húmedo premontano tropical (selva alta); sin embargo, el área donde se encuentra la CH Gera se encuentra deforestada (ELOR 2005).

La Tabla 3 muestra sus principales características físicas y geomorfológicas de la cuenca hidrográfica del río Gera.

Tabla 3: Características físicas y geomorfológicas de la cuenca del río Gera.

Nº	Característica	Valor	Interpretación
1	Área (Km ²)	214.58	Por su tamaño, según PRONAMACHS-MINAM, es una microcuenca (subcuenca).
2	Perímetro (Km)	87.88	Corresponde a una microcuenca alargada.
3	Longitud del curso principal (Km)	34.67	Cran influencia en la escorrentía superficial.
4	Ancho de la cuenca (Km)	2.44	Corresponde a una microcuenca alargada.
5	Altura máxima (m.s.n.m.)	2050.00	Gran variabilidad climática y ecológica, típico de la selva alta.
6	Altura mínima (m.s.n.m.)	810.00	Gran variabilidad climática y ecológica, típico de la selva alta.
7	Altura media (m)	1430.00	Gran variabilidad climática y ecológica, típico de la selva alta
8	Pendiente media del curso principal (por ciento)	0.52	Pendiente alta
9	Pendiente media de la microcuenca (por ciento)	4.78	Pendiente alta
10	Sismicidad	Zona III	Sismicidad Alta porque se encuentra sobre un sistema de fallamiento cortical activo, con epicentros de magnitud distribuidos en la región circundante

FUENTE: Adaptado de Rojas (2014b) y ELOR (2005).

Dentro de la cuenca del río Gera se han identificado 182 áreas con título de propiedad, que suman 14906.09 hectáreas (72.36 por ciento del área total de la cuenca), las cuales pertenecen a personas naturales y jurídicas, estas últimas representan el mayor porcentaje y corresponden a la ZoCRE administrada por Gobierno Regional de San Martín y Electro Oriente, al sur y norte de la cuenca respectivamente (Díaz 2013).

De los 28 centros poblados existentes en la cuenca del río Gera, 20 se ubican en la ZoCRE, principalmente en la zona alta de la cuenca y en donde aún se pueden encontrar algunos remanentes de bosques y nacientes de agua (Díaz 2013). La distribución de las propiedades y de los centros poblados es mostrada en el Anexo 3.

Respecto al río Gera, este se extiende desde la Cordillera Oriental de los Andes (2050 m.s.n.m.) hasta su confluencia con el Río Mayo (810 m.s.n.m.), a la margen derecha del mismo. Presenta volumen de agua durante todo el año, con un caudal promedio mensual histórico entre 2.13 m³/s y 8.21 m³/s. El caudal mínimo mensual histórico

varía entre 0.56 m³/s (junio) y 3.41 m³/s (octubre), y el caudal máximo mensual histórico varía entre 3.84 m³/s (agosto) y 14.70 m³/s (marzo) (Rojas 2014b).

3.2.3. Diseño de la investigación

La investigación se realizó para el período 2006 al 2014, utilizando información recopilada de fuentes primarias y secundarias, incluyendo una visita técnica a la CH Gera realizada del 14 al 17 de agosto de 2016 (el registro fotográfico es mostrado en el Anexo 4). El numeral 3.2.5 del presente documento brinda mayor detalle de las fuentes de información.

A partir de esta información, se elaboró una base de datos con un tamaño de 108 registros con frecuencia mensual de las variables señaladas en el numeral 3.2.4 del presente documento. Con estos datos, se elaboró una función de producción de energía hidroeléctrica de la CH Gera mediante la aplicación del método de cambios en la productividad, utilizando como referencia el *Manual de valoración económica del patrimonio natural* del MINAM (2016). Los datos fueron analizados utilizando como herramienta de apoyo el paquete estadístico EViews10 y el programa Microsoft Office Excel 2010.

Así, en primer lugar, se realizó la determinación del efecto físico de la pérdida de cobertura forestal en la producción de energía hidroeléctrica (MEA 2005, WBCSD 2013). Posteriormente, en segundo lugar, se estimó la función de producción de la energía hidroeléctrica de la CH-Gera con la finalidad de comprobar que la cobertura del bosque es uno de los factores influyentes en la producción. Finalmente, a través de una medida de bienestar basada sobre la función de producción, se determinó el valor económico del bosque húmedo de la cuenca del río Gera a partir de los cambios de la productividad de la CH Gera.

a. Efecto físico del bosque en la producción de energía hidroeléctrica

En esta actividad se estableció la relación entre la cobertura del bosque húmedo de la cuenca del Gera y la producción de energía hidroeléctrica por la CH Gera. Para ello, en primer lugar, se realizó un análisis de causalidad (causa-efecto) para explicar cómo el cambio de la cobertura forestal del bosque húmedo de la cuenca del río Gera implica una variación en la producción de energía hidroeléctrica por la CH Gera y en el bienestar de la población.

En segundo lugar, se analizó la relación de la cobertura forestal con: (1) el caudal de agua disponible en el río Gera en el punto de captación y (2) la concentración de partículas sedimentables en el agua del río Gera, ya que se encuentran relacionados

a los principales servicios ecosistémicos que brinda el bosque a la actividad de generación hidroeléctrica (MEA 2005; Sáenz et al. 2014).

Para ello, previamente, se determinó los valores de la cobertura forestal, el caudal del río Gera y el aporte de sedimentos de la cuenca para el periodo en estudio. En los dos primeros casos se obtuvo los valores de las fuentes descritas en el numeral 3.2.5 del presente documento; en tanto que los sedimentos fueron calculados mediante la aplicación de la formulación empírica Dendy Bolton (Morris y Fan 1998) y el método SARH (Hernández et al. 2002), de acuerdo a lo descrito en el Anexo 6.

Adicionalmente, dado que la literatura señala que el efecto del bosque relacionado a la disponibilidad del agua radica principalmente en el caudal base (CONDESAN et al. 2015, Guo et al. 2000, Cordero et al. 2005), también se analizó la variación temporal del caudal, así como se determinó el caudal base utilizando método de filtros recursivos digitales mediante el software *Web based Hydrograph Analysis Tool* (WHAT).

Se precisa que los datos de la cobertura forestal corresponden a una muestra espacial de la cuenca del río Gera conformada por las microcuencas Paccha, Carrizales, Legiayacu, Playa azul, Chatona y Shucshuyacu, cuya distribución espacial es mostrada en el Anexo 5. La selección de esta muestra fue definida por dos criterios: su representatividad de la cuenca del río Gera y la disponibilidad de información para el periodo de estudio.

La información generada en esta actividad fue un importante insumo para la identificación de los factores de la función de producción de la CH Gera y la estimación de esta, así como para la discusión de los resultados de esta investigación.

b. Función de producción de energía hidroeléctrica por la CH Gera

De acuerdo a MEA (2005) y WBCSD (2013) el método de cambios en la productividad es recomendado para valorar servicios ecosistémicos de regulación, categoría a la que pertenecen los servicios ecosistémicos evaluados en el presente estudio. En general, MEA (2005) indica que este método es el más utilizado por su amplia aplicabilidad y su flexibilidad en el uso de diversas fuentes de datos.

Por otro lado, la aplicación del método de cambios en la productividad en el presente estudio cumple los dos supuestos establecidos por el MINAM (2016) en el *Manual de valoración económica del patrimonio natural*: Existe evidencia de que la cobertura forestal del bosque es un factor relevante en la producción de la energía hidroeléctrica y ésta tiene un mercado establecido; y el precio de la energía hidroeléctrica es conocido.

Asimismo, se disponen de datos que permiten estimar la función de producción. Por ello, se consideró a los cambios de productividad como el mejor método de valoración económica para el presente estudio.

La actividad de generación hidroeléctrica puede resultar compleja por los fundamentos de ingeniería que la sustentan; por ello, el análisis de producción de energía hidroeléctrica suele ser desarrollado en el campo de la ingeniería (Edwards 2003, Førsund 2015).

Al respecto, las ecuaciones (1) y (2) del presente documento han sido utilizadas como la base del modelo de producción de energía hidroeléctrica de diversos estudios, entre los que encontramos a: Moreau et al. (2012), Sáenz et al. (2014), Stickler et al. (2013) Zema et al. (2016). A nivel nacional, la referida ecuación también es ampliamente utilizada (Dammert et al. 2011, OSINERGMIN 2013, Tamayo et al. 2016).

Ante ello, en este estudio se consideró conveniente utilizar como principal referencia la función básica de producción de energía hidroeléctrica propuesta por Førsund (2015) y mostrada en la ecuación (6). En ella, la energía hidroeléctrica depende del agua turbinada como único factor.

A partir de la función básica de producción de Førsund (2015); los fundamentos y antecedentes ya explicados en el Capítulo II de Revisión de Literatura; y el análisis conjunto de los fundamentos de las ciencias ambientales, la ingeniería y la economía, en el presente estudio se especifica la función de producción de la CH Gera de carácter estático conforme a lo mostrado en la ecuación (7).

Esta función de producción incorpora la cobertura forestal y otras variables ambientales como factores de producción de energía hidroeléctrica por la CH-Gera.

El sustento de la incorporación de las variables es explicado en el numeral 3.2.4 del presente documento.

$$ENG_t = f(PP_t, TMAX_t, TMIN_t, CF_t, C5.15_t, EFI_t, SEC_t, DESC_t, A_t), \quad (7)$$

para todo $t=1, \dots, T$

Donde:

ENG : Variable dependiente, energía hidroeléctrica generada por la CH-Gera I en un mes en KWh

PP : Precipitación en mm.

TMAX : Temperatura promedio máxima en C°.

TMIN : Temperatura promedio mínima en C°.

CF : Superficie de microcuencas Carrizales, Paccha, Shatona, Shucshuyacu y Legiayacu con cobertura forestal en Km².

C5.15 : Número de días en que el caudal del río Gera está por debajo de 5.15 m³/s.¹²

EFI : Rendimiento mixto de la turbina, generador y transformador (porcentaje)

SEC : Variable dicotómica. Se asigna 0 en época húmeda y 1 en época seca, la distribución es mostrada en el Anexo 7.

DESC : Variable cualitativa. Se asigna 1 sin descolmatación, 2 a partir de la descolmatación de agosto de 2008, 3 a partir de la descolmatación de junio de 2011 y 4 a partir de la descolmatación de julio de 2014, la distribución de los valores es mostrada en el Anexo 8.

A : Constante

t : Periodo temporal de la observación (mes)

T : Horizonte de tiempo, 2006 a 2014 para este estudio.

En relación a la forma funcional, se identificaron estudios que utilizaron funciones del tipo Cobb Douglas y Translogarítmica (translog) (Sáenz et al. 2014, Bernard et al. 2009, Guo et al. 2007, Reyes et al. 2002). En tanto que Greer (2012) señala que

¹² Caudal de diseño de la CH-Gera I (ELOR 2005)

las funciones tipo cuadrática y cúbica son las más adecuadas para el sector de electricidad¹³ porque oferta dos productos en simultáneo: energía y potencia.

Al respecto, la presente investigación analiza un solo producto: la energía hidroeléctrica; el mismo que es homogéneo. Por ello, se optó por las formas funcionales tipo Cobb Douglas linealizado, translogarítmica y cuadrática conforme a lo mostrado en las ecuaciones (8), (9) y (10), respectivamente. Se aplicó la prueba Ramsey Reset para evaluar la correcta especificación.

$$\begin{aligned}
 \text{Ln } ENG_t = & C + \gamma_0 \text{Ln } PP_t + \gamma_1 \text{Ln } TMAX_t + \gamma_2 \text{Ln } TMIN_t + \\
 & \gamma_3 \text{Ln } CF_t + \gamma_4 \text{Ln } C5.15_t + \gamma_5 \text{Ln } EFI_t + \gamma_6 \text{Ln } DESC_t + \\
 & \gamma_7 \text{Ln } e^{SEC_t} + \gamma_8 \text{Ln } PP_t \times \text{Ln } e^{SEC_t} + \gamma_9 \text{Ln } TMAX_t \times \text{Ln } e^{SEC_t} + \\
 & \gamma_{10} \text{Ln } TMIN_t \times \text{Ln } e^{SEC_t} + \gamma_{11} \text{Ln } CF_t \times \text{Ln } e^{SEC_t} + \\
 & + \gamma_{12} \text{Ln } C5.15_t \times \text{Ln } e^{SEC_t} + \gamma_{13} \text{Ln } EFI_t \times \text{Ln } e^{SEC_t} + \\
 & \gamma_{16} \text{Ln } DESC_t \times \text{Ln } e^{SEC_t} + \mu, \text{ para todo } t=1, \dots, T
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Ln } ENG_t = & C_1 + \beta_0 \text{Ln } PP_t + \beta_1 \text{Ln } TMAX_t + \beta_2 \text{Ln } TMIN_t + \\
 & \beta_3 \text{Ln } CF_t + \beta_4 \text{Ln } C5.15_t + \beta_5 \text{Ln } EFI_t + \beta_6 \text{Ln } DESC_t + \\
 & \beta_7 \text{Ln } e^{SEC_t} + \beta_8 \text{Ln } TMAX_t \text{Ln } PP_t + \beta_9 \text{Ln } TMIN_t \text{Ln } PP_t + \\
 & \beta_{10} \text{Ln } CF_t \text{Ln } PP_t + \beta_{11} \text{Ln } C5.15_t \text{Ln } PP_t + \\
 & \beta_{12} \text{Ln } EFI_t \text{Ln } PP_t + \beta_{13} \text{Ln } DESC_t \text{Ln } PP_t + \\
 & \beta_{14} \text{Ln } TMIN_t \text{Ln } TMAX_t + \beta_{15} \text{Ln } CF_t \text{Ln } TMAX_t + \\
 & \beta_{16} \text{Ln } C5.15_t \text{Ln } TMAX_t + \beta_{17} \text{Ln } EFI_t \text{Ln } TMAX_t + \\
 & \beta_{18} \text{Ln } DESC_t \text{Ln } TMAX_t + \beta_{19} \text{Ln } CF_t \text{Ln } TMIN_t + \\
 & + \beta_{20} \text{Ln } C5.15_t \text{Ln } TMIN_t + \beta_{21} \text{Ln } EFI_t \text{Ln } TMIN_t + \\
 & \beta_{22} \text{Ln } DESC_t \text{Ln } TMIN_t + \beta_{23} \text{Ln } C5.15_t \text{Ln } CF_t + \\
 & \beta_{24} \text{Ln } EFI_t \text{Ln } CF_t + \beta_{25} \text{Ln } DESC_t \text{Ln } CF_t + \\
 & \beta_{26} \text{Ln } EFI_t \text{Ln } C5.15_t + \beta_{27} \text{Ln } DESC_t \text{Ln } C5.15_t + \\
 & \beta_{28} \text{Ln } EFI_t \text{Ln } DESC_t + \beta_{29} \text{Ln } PP_t \text{Ln } e^{SEC_t} + \\
 & \beta_{30} \text{Ln } TMAX_t \text{Ln } e^{SEC_t} + \beta_{31} \text{Ln } TMIN_t \text{Ln } e^{SEC_t} + \\
 & \beta_{32} \text{Ln } CF_t \text{Ln } e^{SEC_t} + \beta_{33} \text{Ln } C5.15_t \text{Ln } e^{SEC_t} + \\
 & \beta_{34} \text{Ln } EFI_t \text{Ln } e^{SEC_t} + \beta_{35} \text{Ln } DESC_t \text{Ln } e^{SEC_t} +
 \end{aligned} \tag{9}$$

¹³ Incluye sus tres segmentos: Generación, transmisión y distribución; así como las actividades de comercialización.

$$\begin{aligned} & \beta_{36} \ln PP_t \ln PP_t + \beta_{37} \ln TMAX_t \ln TMAX_t + \\ & \beta_{38} \ln TMIN_t \ln TMIN_t + \beta_{39} \ln CF_t \ln CF_t + \\ & \beta_{40} \ln C5.15_t \ln C5.15_t + \beta_{41} \ln EFI_t \ln EFI_t + \\ & \beta_{42} \ln DESC_t \ln DESC_t + \mu, \text{ para todo } t=1, \dots, T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ENG_t = & C_2 + \alpha_0 PP_t + \alpha_1 TMAX_t + \alpha_2 TMIN_t + \alpha_3 CF_t + \\ & \alpha_4 C5.15_t + \alpha_5 EFI_t + \alpha_6 DESC_t + \alpha_7 PP_t^2 + \alpha_8 TMAX_t^2 + \\ & \alpha_9 TMIN_t^2 + \alpha_{10} CF_t^2 + \alpha_{11} C5.15_t^2 + \alpha_{12} EFI_t^2 + \alpha_{13} DESC_t^2 + \\ & \alpha_{14} SEC + \mu, \text{ para todo } t=1, \dots, T \end{aligned} \quad (10)$$

Se utilizó el método de estimación de mínimos cuadrados mediante el paquete estadístico EViews10. Para ello, previamente, se ajustó las variables que presentaron estacionalidad (se usó la prueba de Raíz Cuadrada) mediante Modelos de regresión de serie de tiempo con errores ARIMA, valores y dispositivos. También, se realizó la evaluación de la normalidad de los datos a través de la aplicación de la prueba Jarque Bera.

Respecto a la validación económica del modelo, se espera que los coeficientes de las variables PP, DESC y EFI sean positivos y el coeficiente de TMAX, SEC y C5.15 sean negativos, condiciones que harían válido el modelo de acuerdo al comportamiento ambiental esperado según la bibliografía revisada en los capítulos anteriores (CONDESAN et al. 2015, Gammie et al. 2016, Sáenz et al. 2014, Leguía et al. 2008; Cordero et al. 2006; Rojas 2006). En general, se espera una mayor producción de energía hidroeléctrica con el incremento de la cobertura forestal.

En tanto que, en la validación estadística, mediante el paquete estadístico Eviews10, se utilizó un nivel de significancia del cinco por ciento y se realizaron pruebas de significancia individual (Prueba t-student) y grupal de las variables (Prueba F). Asimismo, debido a las series de tiempo y al tipo de método de estimación; se evaluó la heterocedasticidad (prueba White), la autocorrelación (prueba Durbin Watson y la prueba *Breusch-Godfrey Serial Correlation - LM*) y la multicolinealidad (matriz de correlación).

Al respecto, la multicolinealidad se corrigió eliminando una de las variables explicativas que presentaban una alta correlación ($R^2 > 0.7$). En tanto que para

problemas de heterocedasticidad y autocorrelación, se aplicó una de las tres clases de estimadores de varianza robustos que ofrece EViews10 para su corrección (Markit 2017: 33), los cuales son los siguientes:

- Estimadores robustos en presencia de heterocedasticidad. Los estimadores de esta primera clase se denominan estimadores de covarianza coherente de heteroscedasticidad (HC).
- Estimadores robustos en presencia de correlación entre observaciones en diferentes grupos o grupos. Esta segunda clase consiste en la familia de estimadores de varianza de *Cluster Robust* (CR).
- Estimadores robustos en presencia de heterocedasticidad y correlación serial. Los de la tercera clase se denominan estimadores de covarianza coherente de heteroscedasticidad y autocorrelación (HAC).

Finalmente, se eligió el modelo que presentó el mayor valor de R^2 ajustado, los menores valores de los criterios Akaike y Schwartz, así como el valor del estadístico Durwin Watson más cercano a 2.

c. Productividad marginal de la cobertura forestal en la producción de energía hidroeléctrica por la CH-Gera

Los efectos marginales expresan el cambio de la variable dependiente provocado por un cambio unitario en una de las variables independientes (Freeman et al. 2014). En este caso, la productividad marginal de la cobertura forestal (PM_{CF}) representa la variación de la energía hidroeléctrica (ENG) provocada por el cambio unitario de cobertura forestal (CF) del bosque húmedo de la cuenca del río Gera. PM_{CF} es estimada, para cada forma funcional, a través de la expresión (11).

$$PM_{CF} = \frac{\partial ENG (Factor_1, \dots, Factor_n, CF)}{\partial CF} \quad (11)$$

En ese sentido, considerando las formas funcionales lineal, Cobb Douglas y cuadrática (expresiones (8), (9) y (10)); la productividad marginal de la cobertura forestal sería estimada mediante las expresiones (12), (13) y (14), respectivamente.

$$PM_{CF} (Cobb Douglas linealizado) = \gamma_3 x \frac{\overline{ENG}}{CF} \quad (12)$$

$$PM_{CF} (FF \text{ Translogar\u00edtmica}) = (\beta_3 + \beta_{10} \overline{PP} + \beta_{15} \overline{TMAX} + \beta_{19} \overline{TMIN} + \beta_{23} \overline{C5.15} + \beta_{24} \overline{EFI} + \beta_{25} \overline{DESC} + \beta_{32} \overline{SEC} + 2 \beta_{39} \overline{CF}) x \frac{\overline{ENG}}{\overline{CF}} \quad (13)$$

$$PM_{CF} (FF \text{ Cuadr\u00e1tica}) = (\alpha_3 + 2\alpha_{10} \overline{CF}) \quad (14)$$

Donde: \overline{ENG} , \overline{CF} , \overline{PP} , \overline{TMAX} , \overline{TMIN} , $\overline{C5.15}$, \overline{EFI} y \overline{DESC} son valores promedio de las variables respectivas.

d. Valor econ\u00f3mico atribuido a la cobertura forestal del bosque h\u00famedo de la cuenca del rio Gera

En general en el mercado el\u00e9ctrico, en la actividad de generaci\u00f3n, se puede asumir condiciones de competencia. El despacho es realizado a m\u00ednimo costo por el COES y el precio de generaci\u00f3n se obtiene de licitaciones de contratos.

En ese sentido, el valor econ\u00f3mico del bosque h\u00famedo de la cuenca del rio Gera (VE_{CF}) es el cambio en la productividad marginal de la cobertura forestal, determinado al precio de mercado (Simpson 2001), estimado a trav\u00e9s de la expresi\u00f3n (15).

$$VE_{CF} = PM_{CF} x P = \frac{\partial ENG (Factor_1, \dots, Factor_n, CF)}{\partial CF} x P \quad (15)$$

3.2.4. Construcci\u00f3n de variables de an\u00e1lisis

F\u00f8rsund (2005, 2015) propone que la cantidad de energ\u00eda hidroel\u00e9ctrica producida depende principalmente de la cantidad de agua turbinada, ya que las dem\u00e1s variables se pueden considerar constantes en la operaci\u00f3n de una misma central hidroel\u00e9ctrica (ecuaci\u00f3n (5)).

Sin embargo, dado que el objeto de esta investigaci\u00f3n es determinar la influencia de la cobertura forestal en la producci\u00f3n de energ\u00eda hidroel\u00e9ctrica, se realiz\u00f3 un an\u00e1lisis de las variables explicativas del caudal de agua turbinada para relacionarlas con la cantidad de energ\u00eda hidroel\u00e9ctrica producida por la CH Gera.

El caudal del de agua turbinada, es el agua disponible para la generaci\u00f3n de energ\u00eda mediante la ca\u00edda del agua, por lo tanto esta variable depende directamente del caudal disponible en el r\u00edo Gera (CRIO) y del agua almacenada en el embalse (VPRESA), F\u00f8rsund (2005, 2015)

señala que la eficiencia está condicionada por las características de la operación y los equipos de la CH Gera.

Por un lado, el volumen de agua disponible en el embalse depende la capacidad del embalse (CE), disminuye en el tiempo por la acumulación de sedimentos (SDM) (Gracia 1997) y es utilizada cuando el río presenta valores de caudal por debajo del mínimo necesario para el funcionamiento de directo de la central Hidroeléctrica (C5.15). Para el caso específico de la CH-Gera, el caudal necesario para la operación directa de la Central Hidroeléctrica es 5.15 m³/s (ELOR 2005, 2016).

Por otro lado, el caudal del río es afectado por los siguientes factores (CONDESAN 2015):

- CLIMA: Se consideró, precipitación (mm) (PP), temperatura máxima (TMAX) y temperatura mínima (TMIN) en grados centígrados (°C) (Thornthwaite 1948);
- TC: Tamaño de la cuenca (km²), se consideró constante, equivale a 214.5 km²;
- TOPOGRAFÍA: Incluye, altitud, relieve y pendiente, estas tres características no variaron en el período de estudio por lo que se consideraron contantes;
- SUELO: Textura, materia orgánica, no variaron en el período de estudio por lo que se le consideró contante; y,
- CF: Superficie ocupada por la(s) clase(s) de uso de la tierra de la Cuenca Gera (m²). En esta investigación, se considerará solo la subclase *Bosques* de la clase 1.7 *Tierra no usada*, es decir la superficie de bosque en la cuenca.

Asimismo, el volumen de sedimentos también está en función de la **superficie de la cobertura forestal (CF)**, características del suelo, uso del suelo, pendiente, entre otras como se explicó en el Anexo 6 y las descolmataciones que realice ELOR.

De la relación de las variables explicadas se obtuvo la expresión que se muestra en la Figura 9. Dado que se está trabajado con series de tiempo, se podrían generar eventos que representen un corte estructural del periodo evaluado (Gujarati y Porter 2010; Wooldridge 2010). En este sentido se incluyó la variable dicotómica de estiaje (SEC).

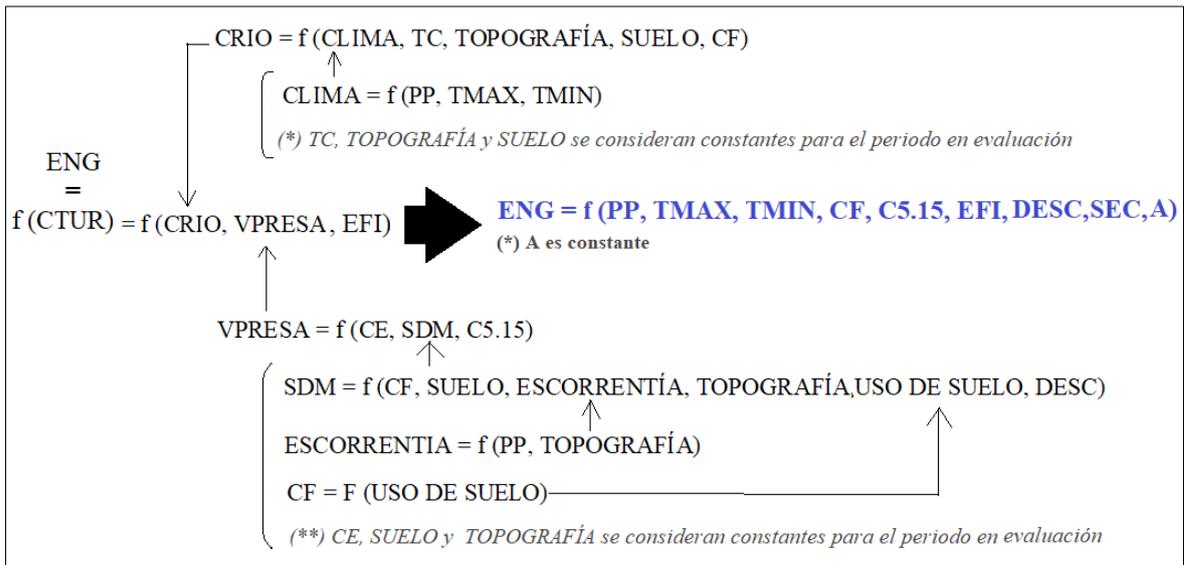


Figura 9: Construcción de las variables de análisis.

Es importante señalar, que la variable ENG solo considera la energía producida por el grupo de generación Gera I, lo que es viable pues Gera I y Gera II trabajan en serie; es decir, el agua que es aprovechada por las dos turbinas de la CH Gera I luego es derivada a Gera II (ELOR 2005); y además ELOR brindó información donde se diferencia la generación de energía por fuente.

En esta decisión también se fundamenta en que el grupo de generación Gera II entró en operación en 2009, en las pérdidas de agua en el traslado de Gera I a Gera II, así como en otras variables relacionadas los procesos y tecnología de la CH Gera (ELOR 2005, 2016).

3.2.5. Fuentes de información

a. Características de la cuenca del río y cobertura forestal

La información sobre la cuenca del río Gera, relevante para la presente investigación, fue obtenida de fuentes secundarias de organizaciones relevantes, especialmente aquellos elaborados en el marco del Proyecto Madre Gera.

La información sobre la superficie de bosque del departamento de San Martín fue obtenida del módulo “Bosque y pérdida del bosque” de la plataforma virtual GEOBOSQUES del PNCBMCC (s.f.) del MINAM. La información disponible presenta una frecuencia anual.

La cobertura forestal de las microcuencas Paccha, Playa azul, Carrizales y Legiayacu, Chatona y Shuchshuyacu fue obtenida del estudio de análisis de cuencas pares de la cuenca del río Gera, realizado por AMPA, *Forest Trends* y CONDESAN (2015).

La información de caudal utilizada para el análisis hidrológico se recopiló a dos escalas. Por un lado, se obtuvo la información de caudales para la cuenca del Gera, registro que maneja la hidroeléctrica Electro Oriente a partir de un monitoreo a escala diaria utilizando un limnómetro en una sección aforada a la salida de la cuenca antes de la bocatoma de la planta.

Por otro lado, se analizó información secundaria referida al estudio de cuencas pares realizado entre el 17 y 21 de noviembre de 2015 por AMPA, CONDESAN y *Forest Trends* (CONDESAN et al. 2015).

Asimismo, se recopiló y sistematizó información primaria y secundaria de los documentos generados por la AMPA realizados en el marco del Proyecto Madre Gera (Rojas 2014a, Diaz 2013, Rojas 2014b, Salgado 2013), CONDESAN (2015) y la Fundación *Forest Trends*.

b. Variables meteorológicas del área de estudio

Los datos meteorológicos de precipitación (PP), temperatura máxima (TMAX) y temperatura mínima (TMIN) corresponden a la estación meteorológica convencional Japelacio (6° 6' 55.5"S, 76° 54' 10"W). Exceptuando a los datos de temperatura máxima y mínima del periodo 2006 al 2009, que corresponden a la estación meteorológica convencional Soritor (6° 8' 43"S, 76° 54' 10"W), porque la estación Japelacio no presentaba esos datos y ambas estaciones son cercanas.

Se accedió a los datos de ambas estaciones meteorológicas mediante la plataforma de datos históricos del Sistema de Información Georreferenciado administrado por SENAMHI¹⁴. En la Figura 10 se muestra las ubicaciones de las estaciones de caudal y meteorológicas.

¹⁴ La guía de acceso y descarga de datos se encuentra disponible en el siguiente enlace: <https://www.senamhi.gob.pe/mapas/descarga-datos/pdf/tutorial-para-la-descarga-de-datos.pdf>

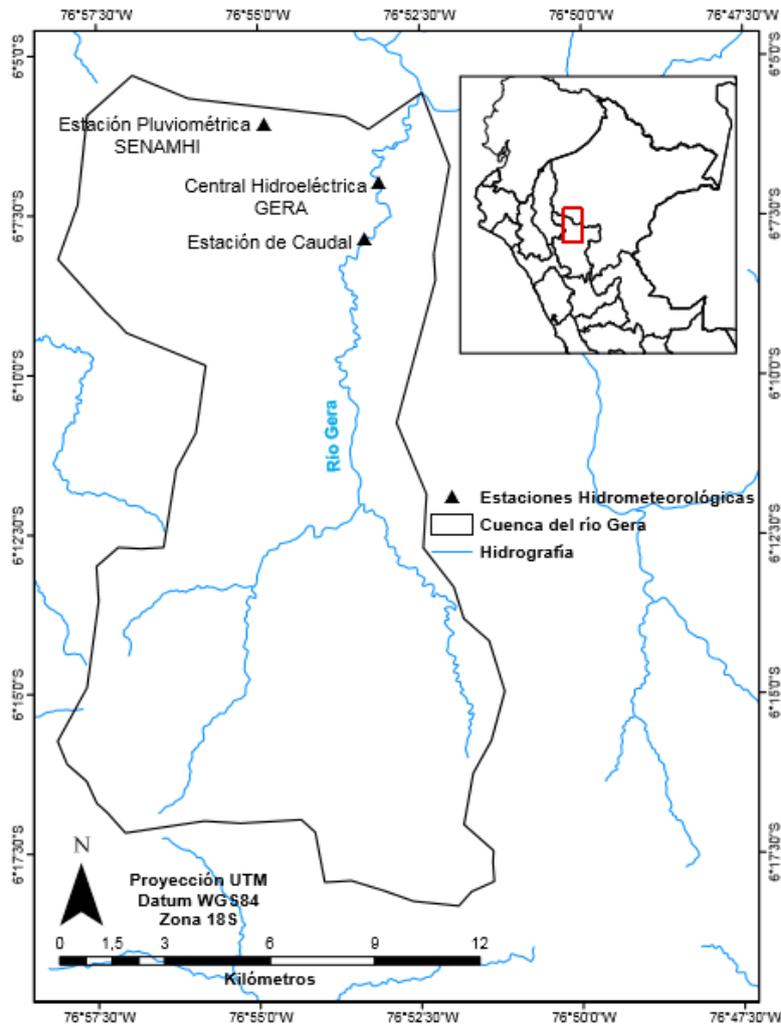


Figura 10: Ubicación de la estación de caudal y las estaciones meteorológicas.

FUENTE: Tomado de CONDESAN (2015).

c. Variables de la infraestructura y operación de la CH Gera

Esta información fue obtenida del registro que lleva a cabo la hidroeléctrica en forma diaria, esto datos están disponibles en forma continua desde que empezó a operar la planta. Específicamente, se recopilaron datos y parámetros sobre la dinámica de operación (ELOR brindó información desde 1992 a la fecha), información sobre los equipos, mantenimiento, caudales turbinados y otros necesarios en el desarrollo de la investigación.

d. Precio medio de generación de electricidad para clientes libres

El valor fue obtenido del Capítulo 2 “Estadística por Regiones” del Anuario Estadístico de Electricidad del año 2018, publicado por el Ministerio de Energía y Minas (2019) en su página web institucional. En el mismo se señala que el precio

medio de electricidad para el año 2018 en la Región de San Martín ascendió a 0.0535 USD/kWh¹⁵.

Finalmente, la información primaria y secundaria relacionada a la Cuenca del Gera y a la operación de la CH-Gera, fue validada y completada en la visita de campo a la CH Gera en Moyobamba – San Martín, realizada por la tesista del 15 al 17 agosto de 2017, con el financiamiento de *Forest Trends* y el apoyo de AMPA y CONDESAN, en el marco del Proyecto Madre Gera. Se realizó entrevistas a la población y a representantes AMPA en el caso de la Cuenca Gera, y a representantes de la ELOR para el caso de la CH Gera.

3.2.6. Limitaciones de la investigación

La investigación tiene algunas limitaciones derivadas de la recolección de la información secundaria y su aplicación para la estimación del modelo econométrico:

- Debido a la disponibilidad de información se realizaron supuestos de valores constantes en las variables que explican el caudal del río Gera y el volumen de la presa, disponibles para ser turbinadas por la CH Gera. Asimismo, se analizó la actividad de generación de energía hidroeléctrica como una actividad de un producto único, cuando en realidad produce dos productos al mismo tiempo: energía y potencia.
- La disponibilidad de datos de las variables físicas ha sido limitada y con diferentes metodologías y frecuencias de medición:
 - o Solo se tuvo acceso a datos anuales de deforestación, por lo que fue necesario realizar un arreglo de esta variable mediante el prorrateo estos datos para obtener valores mensuales e ingresarlos al modelo, y así elevar los grados de libertad.
 - o El uso de la ecuación del limnómetro para la determinación de los valores de los caudales no era precisa, por ello se trabajó con datos de más de una estación meteorológica para completar la información.

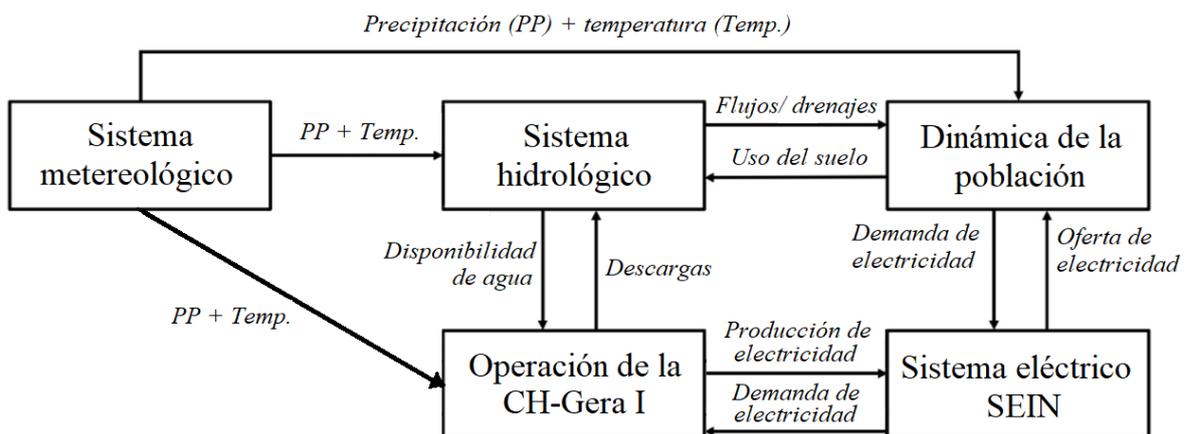
¹⁵ Disponible en: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Capitulo%20%20Estadistica%20por%20Regiones%202018.pdf>

- No se consideró el petróleo como factor de producción porque no se contó con datos de consumo del petróleo por la CH Gera. Sin embargo, es pertinente señalar que el petróleo es un factor importante de la producción porque la CH-Gera debe brindar obligatoriamente una cantidad de energía y potencia de acuerdo con los contratos que tiene, cantidades a las que debe llegar ya sea con fuentes hídricas, a partir de la quema de combustibles, o ambas.
- La presente investigación ha realizado un análisis bidimensional y uniecuacional. Sin embargo, dada la complejidad del sistema de evaluación se requiere una mayor profundización. Al respecto, existen estudios que realizan análisis tridimensional a través de modelamiento (SIG) y desarrolla modelos multiecuacionales, como aquellos mostrados en los antecedentes.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. EFECTO FÍSICO DEL BOSQUE EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA

La generación hidroeléctrica es una actividad que se desarrolla dentro de un sistema donde interactúan diferentes subsistemas físicos y económicos, su dinámica se diagramó en la Figura 11. La comprensión de las interacciones entre estos subsistemas permitió identificar los servicios ecosistémicos que el bosque húmedo de la cuenca del Gera brinda a la CH-Gera I a través de los subsistemas físicos.



Nota: Cada caja representa un subsistema y las flechas representan sus principales interacciones

Figura 11. Esquema de la dinámica de la actividad de generación hidroeléctrica.

FUENTE: Adaptado de Raso et al. (2019).

En el esquema de la Figura 11 no se incluyeron subsistemas biológicos para la simplificación de la identificación de la interacción de los subsistemas y la significancia su aporte en la producción de energía hidroeléctrica. Sin embargo, es pertinente señalar que el subsistema biológico es relevante en la determinación del caudal ecológico que la operación de la CH debe asegurar en el río Gera (Aguilera y Pouilly 2012). Asimismo, la afectación de la fauna y flora puede incrementar el aporte de sedimentos durante el proceso de descomposición de los residuos generados durante la afectación.

En la

Figura 12 se muestra un análisis de causalidad (causa - efecto) que sintetiza las relaciones físicas de la deforestación del bosque húmedo de la Cuenca del Gera respecto a la producción de energía hidroeléctrica por la CH-Gera I. Este tipo de análisis también es denominado función de análisis, pues lo que busca es relacionar los procesos y componentes del ecosistema con sus funciones y servicios, de manera que se pueda tener una lista simplificada de los bienes y servicios que el ecosistema brinda a la actividad en análisis (Bernard et al. 2009).

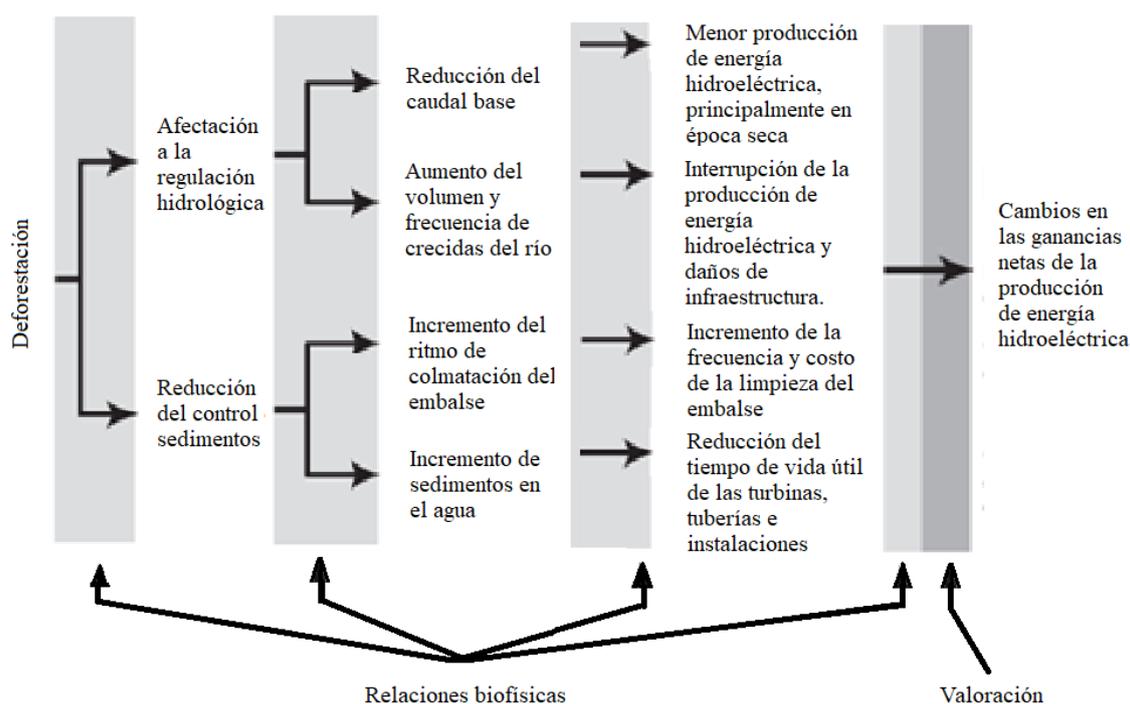


Figura 12: Relaciones físicas de la deforestación consideradas en la valoración del bosque húmedo de la Cuenca del Gera.

FUENTE: Adaptado de MEA (2005).

Al respecto, se consideró la cobertura de bosque húmedo de la cuenca del Gera brinda, principalmente, dos servicios ecosistémicos (CONDESAN et al. 2015) a la CH Gera I:

- Regulación hidrológica: disponibilidad del agua para la generación de energía hidroeléctrica durante la época seca (caudal base) y regulación de crecidas. En este estudio, dados los hallazgos de la FAO (2008), nos centraremos en el segundo componente.
- Control de sedimentos: la concentración de sedimentos disminuye el volumen de agua disponible en el embalse para la generación de energía cuando no se llega a los niveles

de caudal esperados (Sáenz et al. 2014, Barrow et al. 1986, Sáenz y Mulligan 2013), 5.15 m³/s para el caso de la CH Gera (ELOR 2005).

Respecto a la cobertura a la cobertura forestal en la cuenca del Gera, ésta ha disminuido de manera continua, con un valor promedio de 1.3 km² de bosque deforestado al año en el periodo en estudio. Al respecto, la Tabla 4 muestra los valores de la cobertura forestal y tasa de deforestación anual de la cuenca del río Gera.

Tabla 4: Cobertura forestal y tasa de deforestación anual del área priorizada de la cuenca del río Gera para el período 2006 a 2014.

Año	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
CF (km ²)	66.53	63.64	62.82	59.54	58.2	57.9	57.15	56.36	55.34
Tasa de deforestación anual (por ciento)	1.77	4.87	1.46	5.85	2.2	0.51	1.37	1.5	1.96

FUENTE: Gammie et al. (2016)

El SERFOR (2018) señala que, al año 2017, el departamento de San Martín poseía el 4.91 por ciento (33,659 km²) de la superficie total del bosque nacional, siendo el cuarto departamento con mayor superficie de bosque¹⁶. Sin embargo, en el período 2001-2017 se deforestaron 4,151 km² de bosque en este departamento (19.49 por ciento, del total de superficie deforestada a nivel nacional), posicionándolo como el departamento con mayor superficie deforestada a nivel nacional.

La cuenca del río Gera se ubica en el departamento de San Martín por lo que también está afecto a una deforestación continua. Tal como se muestra en la Figura 13, la superficie de su bosque ascendía a 55.34 Km² en 2014, 0.16 por ciento de la superficie del bosque de ese departamento para el mismo periodo (PNCBMCC s.f., SERFOR 2018).

Respecto al aporte de sedimentos de la cuenca del Gera, se realizó la determinación de los sedimentos de acuerdo con la metodología explicada en el literal a del numeral 3.2.3 del presente documento, obteniéndose los datos mostrados en la Tabla 5.

¹⁶ Hay una diferencia notable con los tres superiores: Loreto (51.15 por ciento, 35,074,145 ha), Ucayali (13.65 por ciento, 9,362,764 ha) y Madre de Dios (11.56 por ciento, 7,929,236 ha).

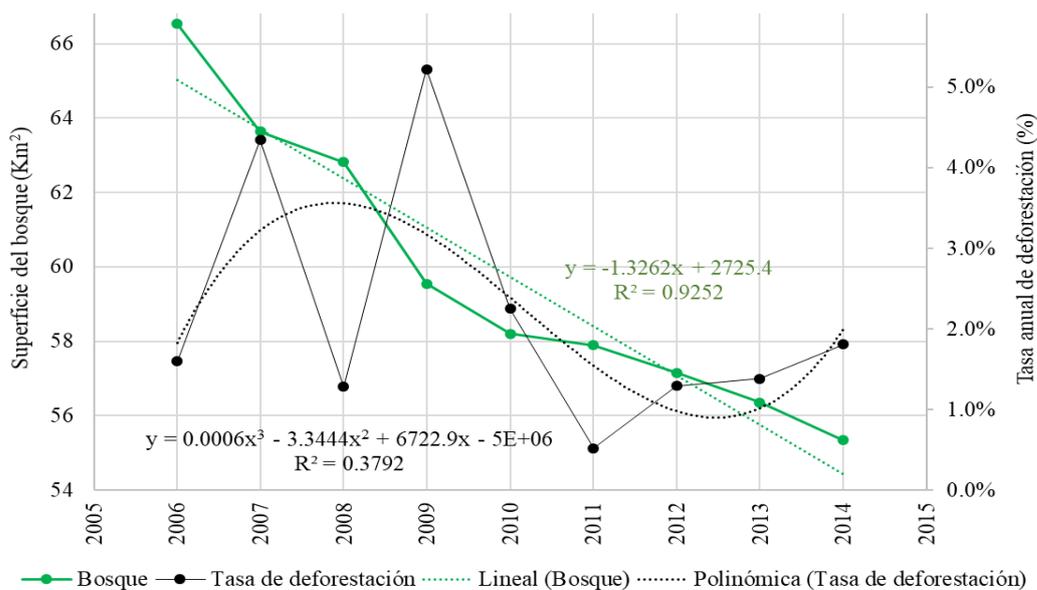


Figura 13: Superficie del bosque de las microcuencas priorizadas de la cuenca del Gera y la tasa de su deforestación para el periodo 2006-2014.

FUENTE: Gammie et al. (2016).

Tabla 5: Sedimentos aportados por la cuenca del río Gera en el período 2005 al 2014.

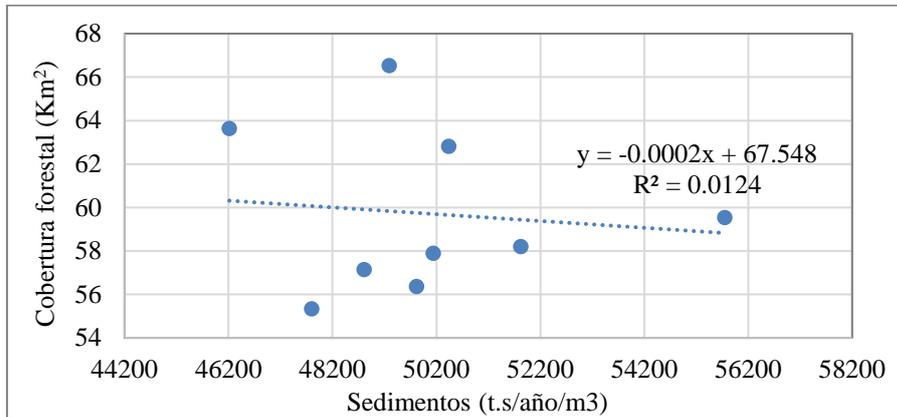
Año	PP (mm)	k	C	Q (mm/s. año)	S	S (m3/año)
2005	1640.5	0.26	0.25	416.85	204.38	204381.48
2006	1207.78	0.26	0.20	238.95	212.41	212407.98
2007	1384.65	0.26	0.22	305.78	209.36	209356.34
2008	1436.63	0.26	0.23	326.97	208.40	208398.07
2009	1376.48	0.26	0.22	302.52	209.50	209504.46
2010	1112.69	0.26	0.19	206.39	213.91	213911.20
2011	1372.27	0.26	0.22	300.84	209.58	209580.52
2012	1651.85	0.26	0.26	422.17	204.15	204146.11
2013	1345.32	0.26	0.22	290.22	210.06	210063.10
2014	1784.50	0.26	0.27	486.84	201.31	201307.10

FUENTE: Elaborado con base en Hernández et al. (2002), SENAMHI (2016), Gracia (1997) y Bolton (1976).

La Figura 14 muestra una comparación entre el valor generado por la división de la cantidad de sedimentos (t/año) entre el caudal promedio anual (m³/s), versus la cobertura forestal reportada en la Plataforma de monitoreo de los cambios en la cobertura de los bosques de Programa Nacional de Conservación del Bosque (PNCBMCC s.f., CONDESAN et al.

2015). Se puede observar una relación inversa; pero una muy baja correlación entre ambas variables ($R^2 = 0.0124$).

Figura 14: Comparación anual de Sedimentos (t/año) con relación al Caudal (m³/s) versus Cobertura forestal (km²).



FUENTE: Elaborado con base en Hernández et al. (2002), SENAMHI (2016), Gracia, (1997), Bolton (1976) y PNCBMCC (s.f.).

Por otro lado, Figura 15 muestra una comparación entre el caudal del río Gera (m³/s) y el caudal base del mismo cuerpo de agua, valor generado por la división de la cantidad de sedimentos (m³/s). Se puede observar una relación inversa; pero una muy baja correlación entre ambas variables.

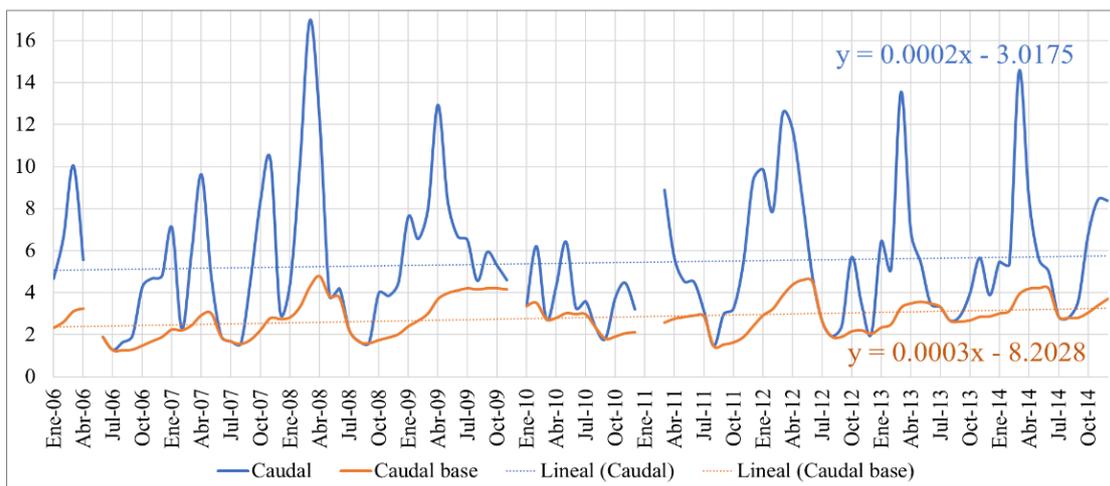


Figura 15: Comparación del caudal versus el caudal base de la cuenca Gera para el periodo 2006-2014.

FUENTE: Elaboración propia con Los resultados del *software* WHAT.

Del análisis de los resultados de la Figura 13, Figura 14 y Figura 15, se puede observar que la cobertura forestal presentaría un comportamiento inverso respecto al aporte de sedimentos y caudal del río Gera. Sin embargo, dados los valores obtenidos no se puede realizar alguna afirmación sobre los mismos.

La alta variación de los datos y la baja correlación del aporte de sedimentos y el caudal del río Gera con los cambios de cobertura forestal, pueden responder a la limitada cantidad de datos cuando se realiza un análisis con frecuencia anual. Asimismo, otro factor a considerar es que la determinación de estos valores se ha realizado a partir de la aplicación de fórmulas que podrían estar reflejando de manera limitada la dinámica entre el ambiente y la operación de la Central Hidroeléctrica.

Asimismo, los valores de caudal fueron estimados a partir de registros diarios de la altura del río Gera del limnómetro colocado por ELOR usando una ecuación específica estimada por ELOR para estimar el caudal en función a la profundidad del río (ELOR, 2014). Es probable que esta ecuación ya no sea válida para los valores extremos del nivel del río y requiera una nueva curva de calibración o curvas de calibración específicas para rangos diferenciados de nivel del río.

CONDESAN, IMHEA y *Forest Trends* (2015) evaluaron la relación entre los datos de nivel y caudal del río Gera para el periodo 2011 al 2015, necesitando dividir los datos en cuatro periodos debido a la discrepancia que existía sobre una relación única que vincule estas variables; asimismo, recomendaron que la curva de descarga que gobierna la relación entre el nivel de agua y el caudal en la cuenca del Río Gera sea revisada y recalibrada frecuentemente con distintos valores de caudal y de alturas.

Por otro lado, el Estudio de Impacto Ambiental de la CH Gera I (ELOR 2005) señala que la avenida de diseño de la CH Gera es $617 \text{ m}^3/\text{s}$, la cual fue calculada con un período de retorno de 500 años. Además, señala que la zona es bastante activa respecto a crecidas inusuales del caudal del río, mencionando eventos en 1999, 1935, 1971, 1921 y 1918; los últimos tres casos fueron aluviones que afectaron puntualmente a Jepelacio. En estos casos los valores del caudal se ubicarían por encima del máximo histórico ($14.7 \text{ m}^3/\text{s}$) y debido a ese comportamiento y a desastres de esa naturaleza reportados en el período de estudio (2006 – 2014), se esperarían datos atípicos; sin embargo, los valores máximos son muy extremos (valor máximo $4315.1 \text{ m}^3/\text{s}$), lo que reiteraría la necesidad de evaluar la validez de la curva

de calibración del limnómetro o la instalación de una estación hidrométrica en la zona. Adicionalmente, los incrementos atípicos del caudal también afectan el desempeño del limnómetro, por lo que se recomendaría evaluar la validez de la relación luego de este tipo de eventos y realizarle mantenimiento periódico (SENAMHI 2008).

Sin perjuicio de lo señalado, el estudio de cuencas pares realizado por *Forest Trends* et al. (2015) en el área de estudio priorizada determinó, con cierto grado de incertidumbre, que una pérdida de alrededor del 10 por ciento de la cobertura forestal en una cuenca, presume una reducción de la producción hídrica de un 15 por ciento. En la Tabla 6 se muestra el detalle de los valores obtenido.

Tabla 6: Información de área de cobertura forestal y caudales para las microcuencas pares.

Microcuenca	Porcentaje de área de bosque	Caudal específico promedio (l/s/m ²)
Carrizales	51.38	37.78
Playa Azul	62.18	44.60

FUENTE: *Forest Trends* et al. (2015).

Ante lo expuesto, se considera que evidencia específica de los beneficio de la cobertura forestal en la regulación hídrica y por lo tanto en la actividad de generación de energía hidroeléctrica. Asimismo, las tendencias obtenidas al graficar los valores de caudal y sedimentos no muestran una tendencia clara, lo que refuerza la necesidad de trabajar con sus variables explicativas.

4.2. FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA POR LA CH GERA

A partir de la base de datos de 108 registros por variable sobre la producción de la CH Gera en el periodo 2006 al 2014, se realizó la estimación del mejor modelo que relacione la cobertura forestal con la producción de energía hidroeléctrica por la CH Gera.

En primer lugar, se evaluó la estacionalidad mediante la prueba de Raíz Cuadrada y se encontró que las siguientes variables presentaron estacionalidad: ENG (1.59 por ciento), PP (0.00 por ciento), TMAX (1.77 por ciento). Por otro lado, las siguientes variables

presentaron estacionalidad en la primera diferencia TMIN (0.00 por ciento), C5.15 (0.85 por ciento) y EFI (0.02 por ciento). La variable CF (62.35 por ciento) no presenta estacionalidad. Los datos de las variables ENG, PP, TMAX, TMIN, C5.15 y EFI fueron ajustados en EViews10 utilizando modelos de regresión de serie de tiempo con errores ARIMA, valores y dispositivos desaparecidos (Anexo 10). Las estadísticas descriptivas de las variables explicativas son mostradas en el Anexo 11.

En segundo lugar, se estimó el modelo econométrico de producción bajo la aplicación de tres formas funcionales: tipo Cobb Douglas linealizado, translogarítmica y cuadrática. En los Anexos 12, 13 y 14, se observa que los modelos de todas las formas funcionales mostraron una significancia grupal en su primera estimación, la probabilidad del estadístico de la prueba F se encuentra en la zona de rechazo *p-value* menor a 5 por ciento. Sin embargo, solo la función del tipo Cobb Douglas presentó significancia de sus variables explicativas, es decir la probabilidad del estadístico de la prueba *t-student* se encontraba en la zona de rechazo *p-value* menor a 5 por ciento. Por ello, en adelante, la presentación de los resultados se realizará a partir de la función tipo Cobb Douglas linealizada.

Tabla 7: Resultados de la segunda estimación del modelo econométrico.

Dependent Variable: LOG(ENG_SA)
 Method: Least Squares
 Date: 12/27/19 Time: 05:52
 Sample: 2006M01 2014M12
 Included observations: 108

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	8.152840	2.996993	2.720340	0.0077
LOG(PP_SA)	0.189554	0.035069	5.405125	0.0000
LOG(TMAX_SA)	-2.535785	0.398865	-6.357508	0.0000
LOG(CF)	3.410972	0.630817	5.407228	0.0000
LDESC	0.370661	0.082343	4.501405	0.0000
R-squared	0.548206	Mean dependent var		14.84037
Adjusted R-squared	0.530660	S.D. dependent var		0.207346
S.E. of regression	0.142049	Akaike info criterion		-1.020095
Sum squared resid	2.078333	Schwarz criterion		-0.895923
Log likelihood	60.08515	Hannan-Quinn criter.		-0.969748
F-statistic	31.24499	Durbin-Watson stat		0.817348
Prob(F-statistic)	0.000000			

FUENTE: Elaboración propia con el programa Eviews10.

La Tabla 7 muestra los resultados de la segunda estimación de la función de producción, luego del retiro de variables explicativas no significativas de la primera estimación de la función de producción. El retiro de estas variables es válido dado que la cantidad de energía

hidroeléctrica producida depende principalmente de la cantidad de agua turbinada, ya que las demás variables se pueden considerar constantes en la operación de una misma central hidroeléctrica (ecuación (5)) (Førsund 2005, 2015).

En la segunda estimación del modelo econométrico de producción de energía hidroeléctrica por la CH Gera, se obtuvo la significancia estadística del modelo (Probabilidad de la prueba F menor a 0.05) y significancia estadística de sus variables explicativas (Probabilidad de la prueba t menor a 0.05) y no se encontró presencia de heterocedasticidad (Anexo 15). Sin embargo, se identificó presencia de multicolinealidad (correlación entre las variables CF y DESC), y autocorrelación, mostrador en el Anexo 16 y Anexo 17, respectivamente.

Al respecto, debido a la menor fiabilidad de los datos y al componente cualitativo de los mismos, se retiró la variable DESC del modelo para corregir la multicolinealidad y se corrigió los problemas de autocorrelación con los filtros de Eviews10. En específico, se aplicó los estimadores robustos de covarianza coherente de Heterocedasticidad y Autocorrelación (HAC); los resultados son mostrados en la Tabla 8.

Asimismo, se realizó la prueba Ramsey RESET para verificar que el modelo ha sido bien especificado, obteniéndose un resultado favorable con una probabilidad del estadístico menor a 0.05 (Anexo 18).

Tabla 8: Modelo econométrico de la producción energía hidroeléctrica por la CH Gera.

Dependent Variable: LOG(ENG_SA)
 Method: Least Squares
 Date: 12/24/19 Time: 17:25
 Sample: 2006M01 2014M12
 Included observations: 108
 HAC standard errors & covariance (Bartlett kernel, Newey-West fixed bandwidth = 5.0000)

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	19.58500	1.754617	11.16198	0.0000
LOG(PP_SA)	0.192314	0.038129	5.043786	0.0000
LOG(TMAX_SA)	-2.640292	0.661428	-3.991804	0.0001
LOG(CF)	0.763777	0.343822	2.221430	0.0285
R-squared	0.459327	Mean dependent var	14.84037	
Adjusted R-squared	0.443730	S.D. dependent var	0.207346	
S.E. of regression	0.154646	Akaike info criterion	-0.859025	
Sum squared resid	2.487193	Schwarz criterion	-0.759687	
Log likelihood	50.38737	Hannan-Quinn criter.	-0.818747	
F-statistic	29.45093	Durbin-Watson stat	0.665330	
Prob(F-statistic)	0.000000	Wald F-statistic	12.71097	
Prob(Wald F-statistic)	0.000000			

FUENTE: Elaboración propia con el programa Eviews10.

Finalmente, el modelo de producción de energía hidroeléctrica de la CH Gera es el que se muestra a continuación:

$$\mathbf{Ln\ ENG_t = C + 0.192314Ln\ PP_t - 2.640292Ln\ TMAX_t + 0.763777Ln\ CF_t}$$

Respecto a la validación económica, esta expresión cumple con el comportamiento ambiental esperado; es decir, que el coeficiente de la variable PP sea positivo, toda vez que la producción de energía hidroeléctrica se incrementa con la presencia de agua (Førsund 2015). Asimismo, se esperaba también una relación inversa con la temperatura máxima; pues está relacionada con la radiación y el incremento de la evapotranspiración que tiene una relación inversa con el agua disponible en el balance hídrico, y por lo tanto el agua disponible para la generación de energía hidroeléctrica.

Asimismo, se verifica que la cobertura forestal del bosque de la cuenca del río Gera es una variable explicativa significativa de la producción de la energía hidroeléctrica por la CH Gera, y que su valor es positivo (0.76). Se esperaba esta relación porque la cuenca del río Gera pertenece a la zona de vida del tipo Bosque húmedo premontano tropical y subtropical (Rojas 2014), la misma que es la transición entre el bosque nuboso y el bosque de selva baja (MINAM 2014). Adicionalmente, existen bosques nubosos contiguos a la cuenca del río Gera de mayor dimensión como es el caso del Bosque de Protección Alto Mayo.

En ese sentido, el bosque de la Cuenca del río Gera brinda servicios ecosistémicos de control de sedimentos y la regulación hídrica en caso de lluvias intensas que puede ofrecer el bosque. Lo que concuerda con la bibliografía revisada sobre los servicios ecosistémicos de regulación hídrica y control de sedimentos para este tipo de zona de vida (Atlason y Unnthorsson 2014, Chen et al. 2015, Sáenz et al. 2014, Stickler et al. 2013, Turconi et al. 2013).

Del modelo econométrico obtenido se observa rendimientos decrecientes de escala (-1.68). Lo cual era también un resultado esperado, pues el informe técnico GSM-G-008-2016 "Informe Ejecutivo sobre la producción de la C.H. GERA I y la C.H. GERA II - enero 2016" (ELOR 2016b), indica que desde el año 2015 la CH Gera ha estado trabajando con un nivel azut que oscila entre 100 y 70 por ciento, siendo la capacidad total del embalse de 228,000.00 m³ en 1992.

Por otro lado, el Informe "Servicio de Batimetría y Topografía para la medición y volumen de sedimentos en la represa de la C.H. GERA - San Martín", realizado por HIDROCONSULT (2008) para ELOR en mayo 2008, indica que se generaron 1637.47 m³ de sedimentos entre noviembre de 2007 y abril de 2008, es decir un volumen de 1637.47 m³ en seis meses.

Finalmente, cabe señalar que existe una muy buena correlación (R^2 equivalente a 45.93 por ciento) entre la energía real y la energía proyectada con la función de producción, tal como se puede observar en la Figura 16.

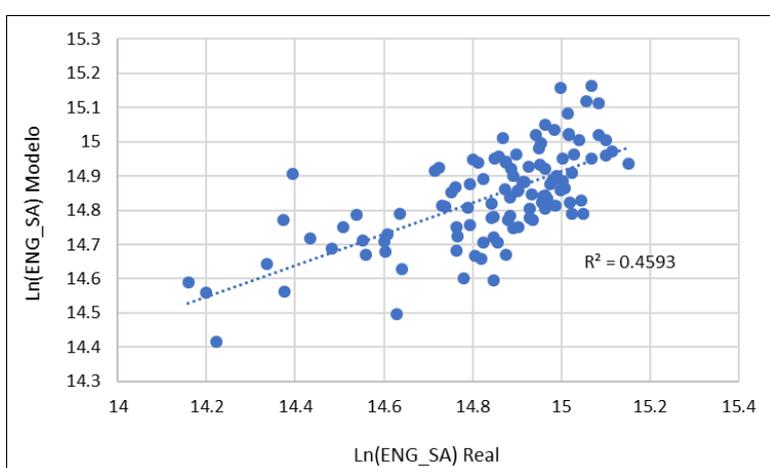


Figura 16: Energía real ajusta (LENG_SA real) versus Energía proyectada con la función de producción de la energía hidroeléctrica por la CH Gera I.

Es importante reiterar, como se mencionó en el numeral 3.2.6. "Limitaciones de la investigación", que se realizó un arreglo de la variable explicativa de la superficie de cobertura forestal de la cuenca del río Gera mediante el prorrateo mensual de los nueve datos anuales de la referida variable para elevar los grados de libertad. Si bien el modelo presenta un R^2 ajustado de 44 por ciento, este arreglo conlleva a limitaciones del modelo a nivel econométrico por problemas de ajuste del modelo, lo cual debe ser considerado cuando se utilice el mismo en otras investigaciones.

4.3. PRODUCTIVIDAD MARGINAL DE LA COBERTURA FORESTAL EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA POR LA CH GERA

Conforme a lo señalado en la ecuación (12), la productividad marginal de la cobertura forestal está dada por la siguiente expresión (PM_{CF}):

$$PM_{CF} = 0.763777 \times \frac{\overline{ENG}}{CF} = 0.7663777 \times \frac{2,849,170 \text{ KWh}}{58.87246 \text{ km}^2} = 36,963.4718014 \text{ KWh/km}^2$$

Lo que indica que por cada kilómetro cuadrado del área priorizada del bosque de la cuenca del río Gera, la CH Gera aumenta su producción en 36,963 KWh, bajo un periodo de análisis mensual. Lo que también se podría entender como que, por cada kilómetro cuadrado del bosque deforestado, la CH Gera dejaría de producir 36,963 KWh al mes.

Respecto a la elasticidad, por cada uno por ciento de incremento en el área del bosque de la cuenca del río Gera, la cantidad de energía hidroeléctrica producida por la CH Gera aumentaría en 0.76 por ciento.

4.4. VALOR ECONÓMICO ATRIBUIDO A LA COBERTURA FORESTA DEL BOSQUE HÚMEDO DE LA CUENCA DEL RÍO GERA

Conforme a lo señalado en la ecuación (15), el valor económico del bosque húmedo de la cuenca del río Gera (VE_{CF}) respecto al cambio en la productividad marginal de la cobertura forestal (Figura 17) determinado al precio de mercado es el siguiente:

$$VE_{CF} = PM_{CF} \times P = 36,963.4718014 \text{ KWh/km}^2/\text{mes} \times 0.0535 \text{ USD/KWh}$$

$$VE_{CF} = 1,977.55 \text{ USD/km}^2/\text{mes} \times (12 \text{ meses}/1 \text{ año}) \times (0.01 \text{ km}^2/1 \text{ ha})$$

$$VE_{CF} = 237 \text{ USD/ha/año}$$

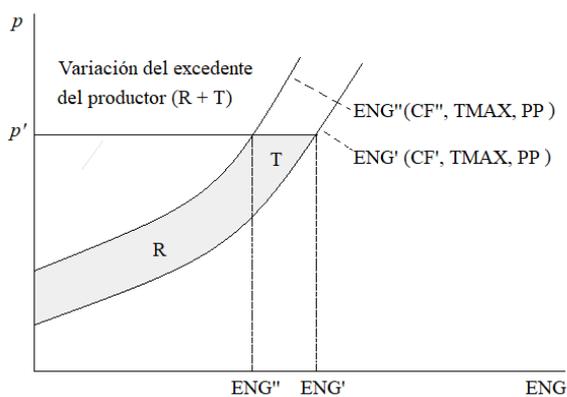


Figura 17: Representación gráfica de la variación de bienestar de la CH Gera ante cambios de la cobertura forestal.

Es pertinente señalar que se asume eficiencia en la aplicación de la ecuación (15) para la determinación del valor económico de la cobertura forestal, es decir se asume que la CH

Gera maximiza sus beneficios. Ello se sustenta en que: (1) la actividad de generación de energía en Perú se realiza, en la mayoría de los casos, en un régimen de libertad de precios (Decreto Ley N° 25844 1992), y (2) la totalidad de los clientes de la actividad de generación de la región San Martín pueden realizar la libre negociación de precios (MINEM 2019).

En ese sentido, el precio utilizado para determinar el valor económico en la presente investigación fue el precio medio de venta de energía eléctrica de los generadores a clientes finales libres en la región San Martín (MINEM 2019).

Se considera que la condición de maximización de beneficios es válida para la generación energía hidroeléctrica en nuestro país, pues la generación de energía se realiza en libre competencia de acuerdo con el diseño del mercado de energía nacional establecido en las normas relacionadas, principalmente a la LCE. Es pertinente señalar que esta norma considera el uso de precios regulados en la generación de energía solo en dos casos (señalados en el literal a y d del artículo 46 de la LCE): (1) la transferencia de potencia y energía entre generadores, determinados por el COES, y (2) las ventas de energía de Generadores a concesionarios de distribución destinadas al Servicio Público de Electricidad; excepto, cuando se hayan efectuado Licitaciones destinadas a atender dicho Servicio.

Aun así, estas dos regulaciones permiten gestionar las fallas del mercado que podrían presentarse en la actividad de generación. En el primer caso el COES, coordina la operación de las centrales de generación en condiciones de eficiencia económica considerando sus costos variables auditados (Okumura 2015). En el segundo caso, introduce las licitaciones donde las tarifas se determinan mediante la oferta de las empresas en el proceso de licitación y la labor del regulador se encontraría enfocada a supervisar el cumplimiento de los compromisos de la empresa que gane la licitación (Tamayo et al. 2016). Lo señalado es explicado en mayor detalle en los puntos 2.1.2 y 2.1.1 del proyecto de tesis.

Asimismo, también es pertinente señalar que dado que la cobertura forestal es un factor fijo a corto plazo; pero variable a largo plazo (Varian 2011), el mercado de generación de energía a largo plazo es de especial interés en la presente investigación, los cuales se desarrollan se desarrolla en condiciones de amplia libertad en nuestro país.

Luego de lo señalado, se reitera que el valor económico de los servicios ecosistémicos de regulación hídrica y control de sedimentos que la cobertura forestal del bosque húmedo de la cuenca del río Gera provee a la CH Gera es 237 USD/ha/año.

Este valor económico obtenido se encuentra por debajo del valor obtenido por Sáenz et al. (2014) que evaluó el valor del bosque en la seguridad energética de la CH Calima con represa en Colombia, el cual ascendió a 305 a 365 USD/ha/año, dependiendo si es un año normal o seco, respectivamente. Cabe señalar que en ese estudio se realizó la determinación del valor económico total, a diferencia del presente que solo ha determinado el valor de uso indirecto relacionado a los servicios ecosistémicos de regulación mencionados en el párrafo anterior.

Asimismo, el valor económico obtenido en el presente estudio se encuentra por encima de los valores obtenidos por Bernard et al. (2009), Guo et al. (2007), Reyes et al. (2002), los cuales ascendieron a 43 USD/ha/año, 80 USD/ha/año y 100 a 179 USD/ha/año, respectivamente.

Ate lo señalado, se debe aclarar que el valor económico obtenido en la presente investigación no constituye el valor económico total del bosque de la cuenca del río Gera; pues los servicios y bienes ecosistémicos que aporta un bosque son múltiples y exceden al valor determinado en la presente investigación. En ese sentido, se reitera que el valor obtenido solo corresponde a los cambios de productividad de la CH Gera a partir de los servicios ecosistémicos de regulación hídrica y control de sedimentos que el bosque le provee.

Sin perjuicio de ello, el valor económico obtenido en la presente investigación es sumamente útil para determinar el pago que debería realizar ELOR como retribuyente del MERESE “Iniciativa Madre Gera” para asegurar la conservación del bosque de la cuenca del río Gera y la sostenibilidad del referido MERESE. Aún más considerando que la recaudación de los recursos económicos de los retribuyentes se realiza mediante donaciones (MINAM 2019), y que si bien ELOR, principal retribuyente del mecanismo, ha manifestado su disposición a pagar; todavía no se ha establecido el monto al cual ascendería este pago (Hidahl et al. 2016).

De manera particular, las consecuencias de la deforestación y reforestación pueden ser evidentes en diferentes lapsos de tiempo. La temporalidad de la manifestación del impacto de la deforestación dependerá de la superficie de bosque deforestado pudiéndose manifestar en el plazo de un año, durante la siguiente estación seca, si el área deforestada es lo

suficientemente extensa. En cambio, el impacto de la reforestación se manifiesta en un plazo mucho más largo en el rango de 10 a 15 años, que es el tiempo que se requeriría para que los árboles crezcan, el ecosistema se consolide y se restablezcan los servicios ecosistémicos (Bruijnzeel et al. 2010).

Estos resultados se constituyen en una oportunidad de cuantificar el impacto económico de la implementación de infraestructura verde mediante estrategias de reforestación y conservación de bosques. Ello puede ser implementado mediante los planes de manejo ambiental, aún más considerando que se ha identificado que la presencia de centrales hidroeléctricas podría incrementar los cambios de uso del suelo en los terrenos circundantes (Chen et al. 2015).

Al respecto, la selección del tipo de especie arbórea y su ubicación en la reforestación deben ser criterios determinantes (Sáenz 2014) debido a las altas tasas de deforestación de San Martín (SERFOR 2018) y que el área de estudio pertenece a la zona de vida del tipo Bosque húmedo premontano tropical y Bosque húmedo subtropical (Rojas 2014b). Por ejemplo, Sáenz et al. (2014) mostró cómo la conservación selectiva del bosque nuboso en los sitios donde se maximiza la producción de servicios de cuenca puede mitigar los impactos significativos de la deforestación en todo el sistema de la cuenca estudiada.

El *World Energy Council* (2019) señala que la región de América Latina y el Caribe necesita gestionar los riesgos de los fenómenos meteorológicos extremos a través de inversiones en infraestructura resistente, gestión de prevención de riesgos y sistemas que permitan recuperación después de un evento climático extremo.

En Perú, la acelerada reducción de los glaciares andinos a consecuencia del cambio climático podría convertirse en los próximos años en un nuevo factor que reduzca la disponibilidad de los recursos hídricos. Es probable que se convierta en un elemento clave en la planificación de la generación de electricidad (ESMAP 2011), aún más si consideramos que la vertiente del Atlántico posee el 87 por ciento del potencial hidroeléctrico (Halcrow y OIST 2011) y alberga el mayor porcentaje del bosque nuboso y de la deforestación del país (MINAM 2014).

En la zona de estudio, además de los motivos señalados, es importante mantener la cobertura forestal por la estructura que le brinda al suelo. De acuerdo con el Reglamento Nacional de

construcciones, el área donde se localiza la CH Gera pertenece a la “Zona 1”, catalogada como de Sismicidad Alta (ELOR 2005).

Por otro lado, que la presencia de la ZoCRE en el área de influencia de la CH Gera es una oportunidad para la conservación de la cobertura forestal del bosque de la cuenca del río Gera, ya que es administrada por el Gobierno Regional de San Martín a través de la Autoridad Regional Ambiental y también posee zonas de bosque nuboso. Además de acuerdo con la norma de su creación, Resolución Gerencial N°001-2012-GRSM/ARA, su principal objetivo es desarrollar actividades orientadas a la protección, conservación, recuperación e investigación de los recursos naturales renovables.

Sin embargo, las siguientes características de la ZoCRE (Díaz 2013, Salgado 2013) son un reto: (1) el uso de suelo (75 por ciento de agricultura y 22 por ciento de agricultura pastoreo), (2) las prácticas de la población (79 por ciento es migrante y 60 por ciento proviene de Cajamarca), y (3) la asignación de propiedades (70 por ciento no tiene una documentación válida legalmente).

El artículo 6 del Reglamento de la Ley N° 30215 reconoce a la regulación hídrica y al control de erosión de suelos como servicios ecosistémicos en los que se puede aplicar MERESE, y que además estos han estado principalmente dirigidos a Empresas Prestadoras de Servicios de Saneamiento y actividades agrícolas (MINAM 2018). Por ello, esta investigación es relevante en la orientación de políticas públicas porque permite cuantificar beneficios e impulsar la participación de las compañías de energía en la protección de los bosques a través de MERESE.

Sin embargo, es importante precisar que el modelo generado en esta investigación podría no ser suficiente para ese fin debido a la limitación de información para su elaboración y porque cada caso de estudio podría tener dinámicas diferentes en el ciclo hidrológico y en la operación de la CH. Asimismo, es necesaria también la innovación en incentivos y procedimientos para operativizar los MERESE y la cuantificación de impactos económicos y ambientales (Sáenz et al. 2014).

V. CONCLUSIONES

1. La superficie de la cobertura forestal del bosque húmedo de la cuenca del río Gera impacta de manera positiva en la generación de energía hidroeléctrica de la CH Gera, y la magnitud de este impacto es superior conforme se incrementa la superficie del bosque de la referida cuenca. Así, por cada uno por ciento de incremento en la superficie de la cobertura forestal, la cantidad de energía hidroeléctrica aumenta en 0.76 por ciento.
2. El bosque húmedo de la cuenca del Gera debido a la zona de vida a la que pertenece brinda, principalmente, dos servicios ecosistémicos a la CH Gera: (1) Regulación hidrológica relacionada a la disponibilidad del agua para la generación de energía hidroeléctrica durante la época seca (caudal base) y regulación de crecidas; y (2) Control de sedimentos referido a la disminución del volumen de agua disponible en el embalse para la generación de energía cuando no se llega a los niveles de caudal del río esperados. A pesar de ello, la cobertura forestal de la referida cuenca está disminuyendo de manera continua, con un valor promedio de 1.3 km² de bosque deforestado al año en el periodo en estudio.
3. La función de producción de la energía hidroeléctrica por la CH Gera depende de la precipitación, la temperatura ambiental máxima y la cobertura forestal, donde la precipitación y cobertura forestal presentan una relación directa y la temperatura ambiental máxima una relación indirecta.
4. La productividad marginal promedio de la cobertura forestal es 36,963 KWh/km²; es decir, por cada kilómetro cuadrado del bosque deforestado, la CH Gera dejaría de producir 36,963 KWh al mes.
5. El valor económico que se atribuyen los servicios ecosistémicos de regulación hídrica y control de sedimentos de la cobertura forestal del bosque húmedo de la cuenca del río Gera, respecto a los cambios de productividad de energía hidroeléctrica por la CH Gera, es 237 USD/ha/año.

VI. RECOMENDACIONES

1. El valor económico obtenido en la presente investigación podría ser utilizado para determinar de manera objetiva el pago que ELOR (retribuyente) aportaría para la conservación de los servicios ecosistémicos realizada la población de área media y alta de la cuenca del río Gera (contribuyentes), de manera que se obtenga el mayor beneficio posible y se aporte a la continuidad y la sostenibilidad del MERESE “Iniciativa Madre Gera”. Esta actividad puede ser promovida por AMPA quien ha liderado ejemplarmente el referido MERESE.
2. Debido a que la vertiente del Atlántico alberga el mayor porcentaje del bosque nuboso, el 87 por ciento del potencial hidroeléctrico y la mayor deforestación de nuestro país; se recomienda investigar el valor económico de este bosque nuboso respecto al potencial de la productividad de energía hidroeléctrica en la vertiente del atlántico de nuestro país, de manera que aporten información relevante para la toma de decisiones y el diseño y aplicación de políticas públicas. Se podría iniciar la investigación en Cuzco porque presenta un alto potencial técnico de generación de energía hidroeléctrica.
3. Realizar modelos de producción multiproducto que integren la potencia y la energía como productos ofertados por una CH. Asimismo, se puede considerar el uso de combustible como sustituto cuando la CH no puede operar debido a que el caudal del río se encuentra por debajo del caudal mínimo de operación.
4. Evaluar las actividades de reforestación y conservación de bosques incluidas en los Planes de Manejo y Acción Ambiental de las CH para identificar si la determinación de del alcance y presupuesto de estas actividades ha considerado el aporte de los servicios ecosistémicos de regulación hídrica y control de sedimentos brindados por el bosque. La correcta aplicación de estas actividades puede ser una oportunidad para incrementar la productividad de una CH.
5. Evaluar la vulnerabilidad de la producción de la CH Gera ante el cambio climático. El caudal disponible en la cuenca del río Gera podría sufrir alteraciones porque la naciente

de esta cuenca se origina la cordillera Oriental de los Andes sobre los 2050 m.s.n.m., y el punto de confluencia con el río Mayo alcanza una altitud de 810 m.s.n.m.

6. Debido a la disponibilidad de información, los datos analizados en esta investigación corresponden a un periodo de nueve años. Ello representa limitaciones al nivel del análisis de datos y representatividad de los resultados. Por ello, se recomienda profundizar la investigación accediendo a información de un periodo de tiempo más extenso a través de COES, e información más precisa de la superficie del bosque a través de imágenes satelitales. Asimismo, se pueden considerar otras variables como el tipo de bosque, la saturación del suelo, los balances hídricos y su impacto en el caudal del río, el tiempo en que demora en crecer el bosque, entre otras.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbott, M. 2001. Is the security of electricity supply a public good? *Electricity Journal* 14 (7) :31–33. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1040-6190\(01\)00224-X](https://doi.org/10.1016/S1040-6190(01)00224-X).
- Aguilera, G; Pouilly, M. 2012. Caudal ecológico: definiciones, metodologías, aplicación en la zona Andina. *Acta zoológica lilloana* 56(October 2016):15–30.
- Atlason, R; Unnthorsson, R. 2014. Energy return on investment of hydroelectric power generation calculated using a standardised methodology (en línea). *Renewable Energy* 66:364–370. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.029>.
- Aylward, B. 2004. Land use, hydrological function and economic valuation (en línea). s.l., s.e. p. 99–120 DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535666.012>.
- Barrow, P; Hinsley, A; Price, C. 1986. The effect of afforestation on hydroelectricity generation. A quantitative assessment. *Land Use Policy* 3(2):141–151. DOI: [https://doi.org/10.1016/0264-8377\(86\)90051-7](https://doi.org/10.1016/0264-8377(86)90051-7).
- Bernard, F; De Groot, R; Campos, J. 2009. Valuation of tropical forest services and mechanisms to finance their conservation and sustainable use: A case study of Tapantí National Park, Costa Rica (en línea). *Forest Policy and Economics* 11(3):174–183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2009.02.005>.
- Biggar, D; Hesamzadh, M. 2014. *The Economics of Electricity Markets*. Primera. IEEE Press/ John Wilwy & Sons Ltd. DOI: <https://doi.org/10.4337/9780857933966>.
- Bishop, J. 1998. The Economics of Non-Timber Forest Benefits: An Overview (en línea). *Development EEP Gateke*(November):21. Disponible en <http://www.iied.org/bookshop/pubs/7537.html>.
- Bonifaz, J. 2001. *Distribución eléctrica en el Perú: Regulación y eficiencia*. Perú, Consorcio de Investigación Económica y Social (CIES)/ Centro de Investigación de la Universidad del Pacífico (CIUP).

- Bruijnzeel, L; Kappelle, M; Mulligan, M; Scatena, F. 2010. Tropical montane cloud forests: state of knowledge and sustainability perspectives in a changing world. In: Bruijnzeel, L, Scatena, F, Hamilton, L. (Eds.), *Tropical Montane Cloud*. s.l., s.e., vol.25. 465–498 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.7974>.
- Bruijnzeel, L. 2004. Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees? vol.104. 185–228 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>.
- Célleri, R; De Bièvre, B; Ochoa, B. 2012. Guía metodológica para el monitoreo hidrológico de ecosistemas andinos. Iniciativa MHEA. s.l., s.e. p. 1–17.
- Chen, G; Powers, R; De Carvalho, L; Mora, B. 2015. Spatiotemporal patterns of tropical deforestation and forest degradation in response to the operation of the Tucuruí hydroelectric dam in the Amazon basin (en línea). *Applied Geography* 63:1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.06.001>.
- Cheng, C; Liu, B; Chau, K; Li, G; Liao, S. 2015. China's small hydropower and its dispatching management (en línea). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42:43–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.044>.
- COES (Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional). 2019a. Documentos de consulta del Portal web del COES (en línea, sitio web). Consultado 17 nov. 2019. Disponible en <http://www.coes.org.pe/portal/>.
- COES (Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional). 2019b. Mapa de líneas existentes en el SEIN actualizado a julio de 2019 (en línea). Lima, Disponible en <http://www.coes.org.pe/Portal/Operacion/CaractSEIN/MapaSEIN>.
- CONDESAN (Consortio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina); IMHEA (Iniciativa Regional de Monitoreo de Ecosistemas Andinos); *Forest Trends*. 2015. Informe de Procesamiento de datos hidrometeorológicos para caracterizar el régimen y respuesta en la cuenca del Río Gera – San Martín – Perú, en base a información de Electro Oriente y SENAMHI San Martín.
- Cordero, S; Montenegro, R; Mafla, M; Burgués, I; Reid, J. 2006. Análisis de costo beneficio de cuatro proyectos hidroeléctricos en la cuenca Changuinola-Teribe (en línea).

- Acd:1–53. Disponible en [http://conservation-strategy.org/files/Changuinola Final.pdf](http://conservation-strategy.org/files/Changuinola_Final.pdf).
- Dammert, A; García, R; Molinelli, F. 2012. Regulación y supervisión del sector eléctrico (en línea). Tercera. Perú, Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Dammert, A; Molinelli, F; Carbajal, A. 2011. Fundamentos técnicos y económicos del sector eléctrico peruano (en línea). OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería) (ed.). s.l., s.e. 206 p.
- Dammert, A; Javier, J; Bautista, L. 2019. El potencial de las energías renovables (RER) en el Perú. Universidad de San Martín de San Martín de Porres (ed.). s.l., s.e. 108 p.
- Decreto Ley N° 25844. 1992. Ley de concesiones eléctricas. Perú, Diario Oficial El Peruano.
- Decreto Supremo No 001-2010-AG. 2010. Reglamento de la Ley No 29338, Ley de Recursos Hídricos. Perú, Diario Oficial El Peruano, vol.5. p. 265–288.
- Diaz, K. 2013. Estudio de Uso y Tenencia de Tierras en la Cuenca del Gera. AMPA/USAID. p. 11.
- DGE (Dirección General de Electricidad). 2012. Documento Promotor del Subsector Electricidad (en línea). s.l., Ministerio de Energía y Minas. Disponible en http://www.minem.gob.pe/archivos/Documento_Promotor_2012.pdf.
- Dupuit, J. 1844. On the measurement of utility of public works, Translated by R. Barback. International Economic Paper 2:83–110.
- Edwards, B. 2003. The economics of hydroelectric power. Edward, E (ed.). s.l., Cheltenham/Northampton.
- ELOR (Empresa Regional de Servicio Público de Electricidad del Oriente S.A.). 2005. Estudio de Impacto Ambiental para la Ampliación de la Central Hidroeléctrica de Gera (GERA II) - 2 MW (en línea). (Gera II):356. Disponible en [https://www.dropbox.com/home/Gera Análisis hidro-Económico/Información ElectroOriente?preview=EIAGeraII.pdf](https://www.dropbox.com/home/Gera_Análisis_hidro-Económico/Información_ElectroOriente?preview=EIAGeraII.pdf).

- ELOR (Empresa Regional de Servicio Público de Electricidad del Oriente S.A.). 2008. Informe final del servicio de descolmatación de la represa de la Central Hidroeléctrica del Gera. Tarapoto, Perú, s.e.
- ELOR (Empresa Regional de Servicio Público de Electricidad del Oriente S.A.). 2015. Plan Anual de Adquisiciones y Contrataciones - PAAC 2015 - Tercer Trimestre. San Martín, PE, s.e.
- ELOR (Empresa Regional de Servicio Público de Electricidad del Oriente S.A.). 2016a. Balances y erogaciones de las Subestaciones Gera I, Gera II. San Martín, PE, s.e.
- ELOR (Empresa Regional de Servicio Público de Electricidad del Oriente S.A.). 2016b. Informe Técnico GSM-G-008-2016 “Informe Ejecutivo sobre la Producción de la C.H. Gera I y C.H. Gera II - enero 2016” Objetivo: Moyobamba, San Martín, Perú, s.e. p. 1–9.
- ENDESA Educa. 2016. Centrales Hidroeléctricas (en línea, sitio web). Disponible en http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xi.-las-centrales-hidroelectricas#.
- ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program). 2011. ESMAP Annual Report 2011. Disponible en: <https://www.esmap.org/node/1383>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2008. Forest and water: A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005. Roma, s.e.
- Forest Trends; AMPA (Amazónicos por la Amazonía); CONDESAN (Consortio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina). 2015. Informe de análisis de cuencas pares en la cuenca del río Gera. San Martín, PE., s.e.
- Førsund, F. 2005. Hydropower Economics. 1 ed. Noruega, Universidad de Oslo. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-73027-1>.
- Førsund, F. 2015. Hydropower Economics. 2 ed. Price, C; Zhu, J; Hillier, F (eds.). New York, Springer International Publishing, vol.326. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7519-5>.

- Freeman, M; Harrington, W. 1990. Measuring Welfare Values of Productivity Changes. *Southern Economic Journal* 56(4):892. DOI: <https://doi.org/10.2307/1059879>.
- Freeman, M; Herriges, J; Kling, C. 2014. *The Measurement of Environmental and Resource Values: Theory and Methods*. 3 ed. Rosenbaum, WA; Stine, JK (eds.). s.l., Advisers for RFF Press, vol.72. 274 p. DOI: <https://doi.org/10.2307/3146972>.
- Frisch, R. 1965. *Theory of Production*. s.l., Springer. 370 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-6161-1>.
- Gammie, G; Vilca, R; Bardales, J; Díaz, R. 2016. Análisis de los beneficios hidroeconómicos de la Cuenca Gera (En redacción). *Forest Trends/ AMPA/ CONDESAN*. San Martín, PE, s.e.
- García, C. 2007. Regulación hídrica bajo tres coberturas vegetales en la cuenca del río San Cristóbal, Bogotá D.C. *Colombia Forestal* 10(20):127–147.
- Goor, Q; Kelman, R; Tilman, A. 2016. Optimal Multipurpose-Multireservoir Operation Model with Variable Productivity of Hydropower Plants. *Journal of Water Resources Planning and Management* 142(3):258–268. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452).
- Gracia, J. 1997. Sedimento en embalses. Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. p. 54.
- Greer, M. 2012. *Electricity Marginal Cost Pricing: Applications in Eliciting Demand Responses*. Estados Unidos, Elsevier. 346 p.
- Gujarati, D; Porter, D. 2010. *Econometría* (en línea). Quinta. México, Mc Graw Hill. 946 p. Consultado 4 ago. 2017. Disponible en https://scalleruizunp.files.wordpress.com/2015/04/econometria_-_damodar_n-_gujarati.pdf.
- Gulliver, J; Arndt, R. 1991. *Hydropower engineering handbook*. s.l., MacGRAW-HILL.
- Guo, Z; Li, Y; Xiao, X; Zhang, L; Yaling, G. 2007. Hydroelectricity Production and Forest Conservation in Watersheds. *Ecological Applications* 17(6):1557–1562.

- Guo, Z; Xiao, X; Li, D. 2000. An Assessment of ecosystem services: water flow regulation and hydroelectric power production. *Ecological Applications* 10(3):925–936.
- Halcrow; OIST. 2011. Atlas del potencial hidroeléctrico del Perú. Lima, PE. Dirección de Electrificación Rural del Ministerio de Energía y Minas, Banco Mundial, GEF. p. 50.
- Hernández, O; Cobos, C; Ortiz, A. 2002. Valoración económica del servicio ambiental de regulación hídrica: Lado sur de la Reserva de la Biósfera Sierra de las Minas, Guatemala. Fortalecimiento Institucional en Políticas Ambientales (FIPA)/ Programa Ambiental de la Agencia para el Desarrollo de los Estados Unidos (AID).
- HIDROCONSULT E.I.R.L. 2008. Servicio de batimetría y topografía para la medición y volumen de sedimentos en la represa de la Central Hidroeléctrica del Gera - San Martín. Tarapoto, PE, s.e.
- Hildahl, K; Garzón, A; Castañeda, I. 2016. Informe de lecciones aprendidas: Compartiendo aprendizajes sobre mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos. USAID - ICAAA. Recuperado de: [http://biblioteca.spda.org.pe/biblioteca/catalogo/_data/20170908180124_Compartiend o%20aprendizajes.pdf](http://biblioteca.spda.org.pe/biblioteca/catalogo/_data/20170908180124_Compartiend%20aprendizajes.pdf)
- Hunt, S. 2002. Making competition work in electricity. New York, John Wiley & Sons Inc.
- INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). 2019. Series Nacionales de Electricidad (en línea, sitio web). Consultado 19 oct. 2019. Disponible en <http://webapp.inei.gob.pe:8080/sirtod-series/>.
- IEA (Internacional Energy Agency). 2019. World Energy Balances Overview (en línea). 53. s.l., s.e. Disponible en <https://webstore.iea.org/>.
- IRENA (International Renewable Energy Agency). 2014. PERÚ: Evaluación del estado de preparación de las energías renovables 2014 (en línea). s.l., s.e. Disponible en https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/Peru_RRA_2014_ES.pdf.
- Jaén, M. 2000. Economía del sector eléctrico. DA-200000. España, Universidad de Almería.
- Joskow, P. 2008. Electricity Market Liberalization: Lessons Learned. *The Energy Journal* 29(SI2):9–41. DOI: <https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol29-NoSI2-3>.

- Leguía, E; Locatelli, B; Imbach, P; Pérez, C; Vignola, R. 2008. Servicios ecosistémicos e hidroenergía en Costa Rica (en línea). *Ecosistemas* 17(1):16–23. Disponible en <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=524>.
- Ley No 29338. 2009. Ley de recursos hídricos. Perú, Diario Oficial El Peruano.
- Ley No 30215. 2014. Ley de Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos (en línea). Perú, Diario Oficial El Peruano. p. 526501–526503. Disponible en http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/06/ley_302105_MRSE.pdf.
- Markit, I. 2017. *Eviews 10: User's Guide II*. 2 ed. California, IHS Global Inc.
- Marshall, A; Marshall, M. 1879. *The economics of Industry*. 2da ed. Londres. Macmillan.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. *A Report of the Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being* (en línea). s.l. Disponible en <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>.
- MINAM (Ministerio del Ambiente). s. f. *Incubadora de Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos (Folleto)*. Lima, Perú, s.e.
- MINAM (Ministerio del Ambiente). 2014. *Perú Reino de Bosques*. Lima, Perú, Disponible en <http://www.bosques.gob.pe/archivo/files/pdf/perureinodebosques.pdf>.
- MINAM (Ministerio del Ambiente). 2015. *Manual de valoración económica del patrimonio natural* (en línea). Perú, MINAM. p. 85. Consultado 6 dic. 2016. Disponible en <http://www.minam.gob.pe/patrimonio-natural/wp-content/uploads/sites/6/2013/09/MANUAL-VALORACIÓN-14-10-15-OK.pdf>.
- MINAM (Ministerio del Ambiente). 2016. *Guía de Valoración Económica del Patrimonio Natural* (en línea). Segunda. Perú, MINAM. 44 p. Disponible en <http://www.minam.gob.pe/patrimonio-natural/wp-content/uploads/sites/6/2013/10/GVEPN-30-05-16-baja.pdf>.
- MINAM (Ministerio del Ambiente). 2018. *Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos Hídricos con juntas de usuarios de riego: Orientación para la práctica*. Recuperado de <http://www.minam.gob.pe/economia-y-financiamiento->

ambiental/wpcontent/uploads/sites/128/2018/12/Brochure-MERESE-HÍDRICOS-1.pdf

MINAM (Ministerio del Ambiente). 2019. Registro Único de MERESE. Recuperado el 14 de febrero de 2020 de <https://serviciosecosistemicos.minam.gob.pe/>

MINEM (Ministerio de Energía y Minas). 2019. Anuario Estadístico de Electricidad 2018 (en línea, sitio web). Consultado 24 oct. 2019. Disponible en http://www.minem.gob.pe/_estadistica.php?idSector=6&idEstadistica=13285.

MINEM (Ministerio de Energía y Minas). 2018. Anuario Ejecutivo de Electricidad 2016 (en línea). s.l., s.e. Disponible en http://www.minem.gob.pe/_publicacion.php?idSector=6&idPublicacion=571.

Moreau, V; Bage, G; Marcotte, D; Samson, R. 2012. Statistical estimation of missing data in life cycle inventory : an application to hydroelectric power plants (en línea). *Journal of Cleaner Production* 37:335–341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.036>.

Morris, G; Fan, J. 1998. *Reservoir Sedimentation Handbook*. s.l., Mc Graw Hill.

Nicholson, W. 2004. *Teoría microeconómica. Principios básicos y ampliaciones*. 8 ed. España, Thomson. 761 p.

Okumura, P. 2015. El mercado mayorista de electricidad en el Perú. *THEMIS: Revista de Derecho* (68):261–277.

OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería). 2011. *Compendio de centrales hidráulicas y térmicas de las empresas de distribución: Volumen II*. Lima, Perú, s.e. p. 1–160.

OSINERGMIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería). 2013. *Determinación de la potencia efectiva de centrales hidroeléctricas*. Lima, Perú, s.e. p. 1–57.

Pearce, D. 1993. *Economic values and natural world*. 1ra ed. Londres, Routledge. 129 p.

- Pennsylvania State University. 2015. Energy Markets, Policy, and Regulation (en línea, sitio web). Consultado 24 oct. 2019. Disponible en www.e-education.psu.edu/eme801/node/617.
- Pindyck, R; Rubinfeld, D. 2009. Microeconomía. Séptima ed. España, PEARSON EDUCACIÓN S.A.
- PNCBMCC (Programa Nacional de Conservación de Bosques para la Mitigación del Cambio Climático). s.f. Plataforma GEOBOSQUES del Ministerio del Ambiente. Lima, Perú.
- Quintero, M; Pareja, P. 2015. Estado de avance y cuellos de botella de los mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos hidrológicos en Perú (en línea). CO: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) (ed.). Cali, s.e. 40 p. Consultado 13 dic. 2016. Disponible en http://ciat-library.ciat.cgiar.org/articulos_ciat/biblioteca/CIAT_CUELLOS_DE_BOTELLA_DE_LOS_MECANISMOS_DE_RETRIBUCION_POR_SEH_EN_PERU.pdf.
- Raso, L; Barbier, B; Bader, J. 2019. Modeling dynamics and adaptation at operational and structural scales for the ex-ante economic evaluation of large dams in an African context (en línea). *Water Resources and Economics* 26(December 2017):100125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wre.2018.08.001>.
- REN21. 2019. Renewables 2019 Global Status Report (en línea). Paris: REN21 Secretariat, s.e. 336 p. Disponible en https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf.
- Reyes, V; Segura, O; Verweij, P. 2002. Valuation of hydrological services provided by forests in Costa Rica. Understanding and capturing the multiple values of tropical forests. *Proceedings of the International seminar on valuation and innovative financing mechanisms in support of conservation and sustainable management of tropical forests* (June 2014):101–106. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Rojas, A. 2014a. Estudio geológico de la cuenca del Río Gera. San Martín, Perú, AMPA/USAID.

- Rojas, A. 2014b. Estudio hidrológico de la cuenca del Río Gera. San Martín, Perú, AMPA/ USAID.
- Rojas, M. 2006. Evaluación económica del proyecto hidroeléctrico Tocomá versus un proyecto térmico. Caracas, Venezuela. Universidad Simón Bolívar.
- Sáenz, L; Mulligan, M. 2013. The role of cloud affected forests (CAFs) on water inputs to dams. *Ecosystem Services* 5:69–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.02.005>.
- Sáenz, L; Mulligan, M; Arjona, F; Gutiérrez, T. 2014. The role of cloud forest restoration on energy security (en línea). *Ecosystem Services* 9:180–190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.06.012>.
- Salgado, M. 2013. Estudio socioeconómico en la cuenca del Gera. San Martín, Perú, AMPA/ USAID.
- SENAMHI (Servicio de Meteorología e Hidrología). 2008. Guía de Hidrometría de aguas superficiales: medición del nivel del agua. Lima, PE, DGH (Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos). p. 25.
- SENAMHI (Servicio de Meteorología e Hidrología). 2016. Datos históricos del Sistema de Información Georeferenciado (en línea). San Martín, Perú, Disponible en <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=descarga-datos-hidrometeorologicos>.
- Serra, J. 2015. Propuestas para mejorar los procesos de evaluación ambiental y social de hidroeléctricas en el Perú. Lima, Perú, s.e.
- SERFOR (Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre). 2018. Reporte de los Bosques Húmedos Amazónicos al 2017 (en línea). Lima, Perú, SERFOR. Disponible en <http://geo.serfor.gob.pe/geoserfor/index.php/zonificacion/reportes-humedales>.
- Simpson, R. 2001. A Note on the Valuation of Ecosystem Services in Production. Discussion Papers (April).
- Stickler, C; Coe, M; Costa, M; Nepstad, D; Mcgrath, D; Dias, L. 2013. Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. 110(23):9601–9606. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1215331110>.

- Tamayo, J; Salvador, J; Vásquez, A; Vilches, C. 2016. La Industria de la electricidad en el Perú: 25 años de aportes al crecimiento económico del país. Primera. Lima, Osinergmin. 354 p.
- Turconi, R; Boldrin, A; Astrup, T. 2013. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability, and limitations (en línea). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28:555–565. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.013>.
- Varian, H. 2011. *Microeconomía intermedia: Un enfoque actual*. 8 ed. España, Antoni Bosch.
- Vilca, R. 2015a. La voz del Gera: lecciones aprendidas para impulsar un mecanismo de retribución por servicios ecosistémicos. San Martín, Perú, AMPA.
- Vilca, R. 2015b. Mecanismo de Retribución por Servicios Ecosistémicos en la Cuenca del Gera Ubicación. San Martín, Perú, AMPA.
- Wooldridge, J. 2010. *Introducción a la econometría: Un enfoque moderno* (en línea). Cuarta. s.l., Cengage Learning. Consultado 4 ago. 2017. Disponible en https://www.izt.uam.mx/mydes/wp-content/uploads/2016/04/Wooldridge_4ta_español_1y2.pdf.
- WBCSD (World Business Council for Sustainable Development). 2013. *Business guide to water valuation: An introduction to concepts and techniques* (en línea). Suiza, s.e. p. 80. Disponible en <https://www.wbcsd.org>.
- World Energy Council. 2016. *World Energy Resources 2016* (en línea). s.l., s.e. Consultado 28 sep. 2019. Disponible en <https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf>.
- World Energy Council. 2019. *World Energy Issues Monitor 2019* (en línea). United Kingdom, s.e. Consultado 28 sep. 2019. Disponible en <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/1.-World-Energy-Issues-Monitor-2019-Interactive-Full-Report.pdf>.
- Zema, D; Nicotra, A; Tamburino, V; Zimbone, S. 2016. A simple method to evaluate the technical and economic feasibility of micro hydro power plants in existing irrigation

systems (en línea). *Renewable Energy* 85:498–506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.066>.

Zimmermann, M; Meir, P; Silman, M; Fedders, A; Gibbon, A; Malhi, Y; Urrego, D; Bush, M; Feeley, K; Garcia, K; Dargie, G; Farfan, W; Goetz, B; Johnson, W; Kline, K; Modi, A; Rurau, N; Staudt, B; Zamora, F. 2010. No differences in soil carbon stocks across the tree line in the Peruvian Andes. *Ecosystems* 13(1):62–74. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-009-9300-2>.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Esquema gráfico simplificado de la operación de Gera I de la CH Gera.

1. Embalse (A)



4. Cámara de carga (C)



2. Desarenador (B)



5. Tubería (salida cámara de carga)



3. Canal (salida de desarenador)



6. Casa de máquinas de Gera I (D)



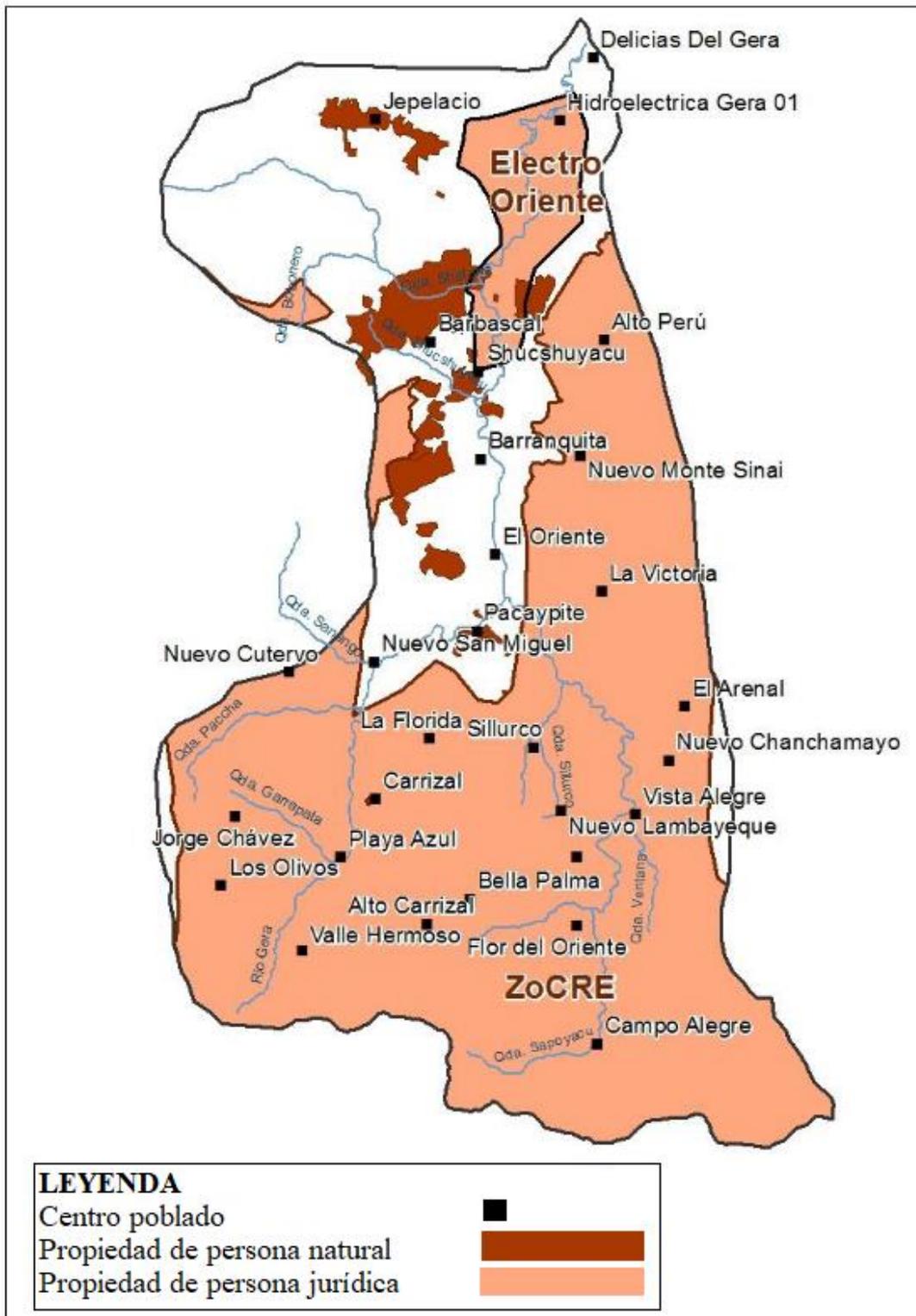
Anexo 2: Características técnicas de las turbinas, generadores y transformadores de la CH Gera.

TURBINAS			
Identificación	U1	U2	U3
Marca	VEVEY	VEVEY	LINHAI MACHINERY
Serie	Vevey-Suiza	Vevey-Suiza	200601
Tipo	Francis	Francis	Francis
Eje	Horizontal	Horizontal	Horizontal
Revoluciones (RPM)	900	900	600
Potencia nominal (MW)	3.0	3.0	1.95
Salto neto (m)	163	163	42
Caudal de diseño (m ³ /s)	3.5	3.5	5.27
Año de fabricación	1988	1988	2008
Año de puesta en servicio	1992	1992	2008
GENERADORES			
Identificación	U1	U2	U3
Marca	CADEMESA	CADEMESA	LINHAI MACHINERY
Modelo	Sincrónico	Sincrónico	Sincrónico
Tipo	WA111/70/8	WA111/70/8	SFW-J1650-12/1730
Serie	110.064.027	110.064.027.01	200601
Revoluciones (RPM)	900	900	600
Potencia aparente (MW)	3.850	3.850	0.220
Potencia nominal (MW)	3.080	3.080	0.195
Potencia efectiva (MW)	3.0	3.0	0.180
Tensión de salida (kV)	10	10	0.416
Corriente de salida (A)	27.8	27.8	301
Factor de potencia	0.8	0.8	0.8
Frecuencia (Hz)	60	60	60
Año de puesta en servicio	1992	1992	2008
TRANSFORMADORES			
Denominación	TRAFO 1	TRAFO 2	TRAFO GERA 2
Marca	General Electric	General Electric	ABB
Serie	s.d.	2302558P	L 350429-01
Relación de tensión	10/60	10/20	4.16/10
Potencia nominal (MVA)	7000	615	2.200
Intensidad (p/s) (A)	404-67A	18455	s.d.
Frecuencia (Hz)	60	60	60
Tensión de C.C. (por ciento)	6	4.15	s. d
Grupo de conexión	Dy11	Dy11	YNd5
Año de fabricación	1987	1987	2008
Año de puesta en servicio	1991	1991	2008

Nota: s.d.: sin datos

FUENTE: Osinergmin (2011).

Anexo 3: Distribución de las propiedades y de los centros poblados de la cuenca del río Gera.



FUENTE: Diaz (2013).

Anexo 4: Registro fotográfico de la visita técnica realizada a la CH Gera del 15 al 17 de agosto de 2016.



Represa y embalse de la CH Gera



Embalse de la CH Gera



Desarenador y compuertas de CH Gera

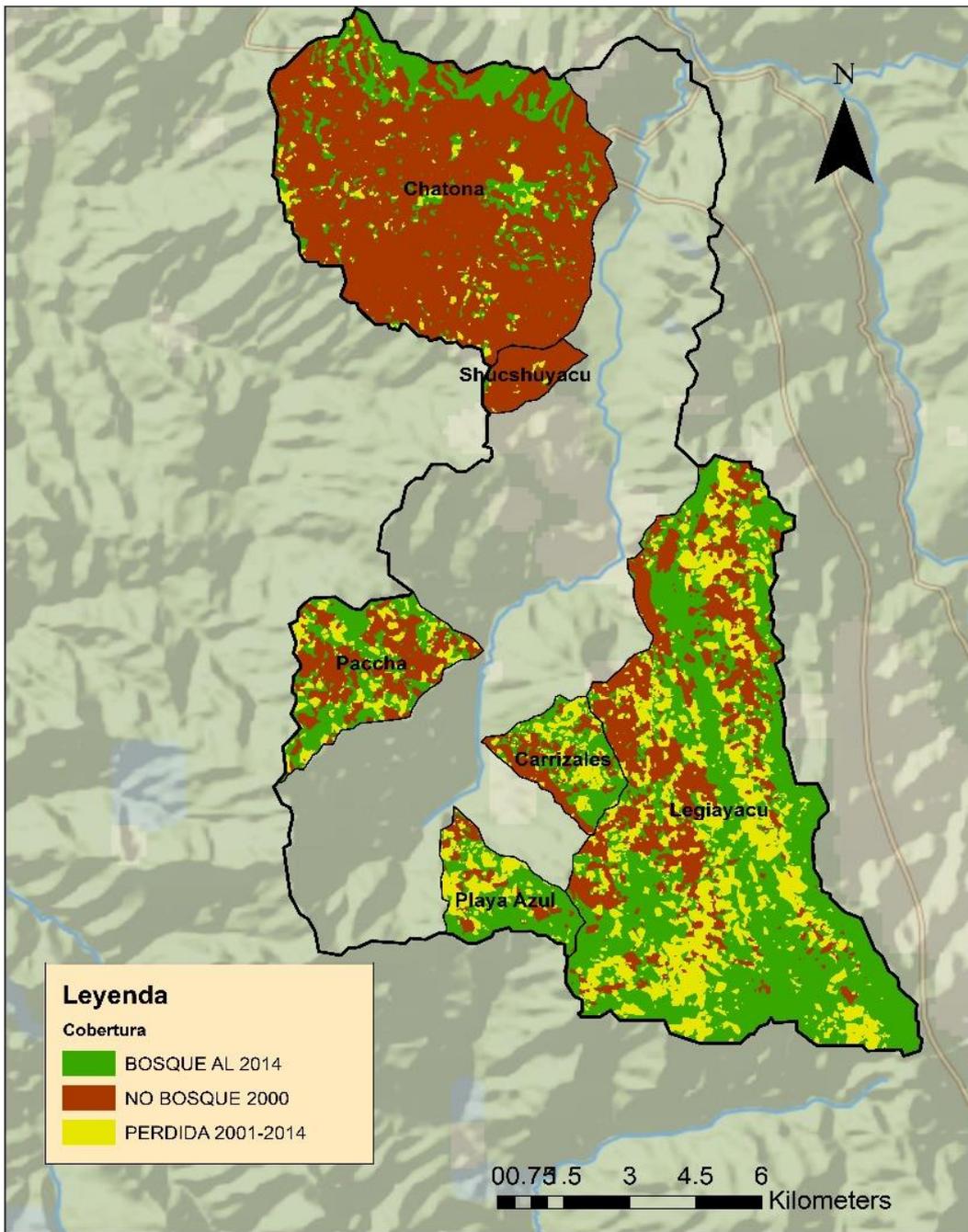


Desarenador y compuertas de CH Gera



Vista de generador y turbina en la casa de máquinas de GERA I de la CH Gera

Anexo 5: Ubicación y cobertura forestal de las microcuencas seleccionadas para el análisis de cuencas pares.



FUENTE: CONDESAN *et al.* (2015)

Anexo 6: Metodología para la determinación del aporte de sedimentos de la cuenca del Gera.

La concentración de los sedimentos en el caudal del río Gera disponible para la utilización en la CH-Gera fue determinado a partir de la aplicación de fórmulas hidráulicas que relacionan las características físicas de la cuenca del Gera, principalmente: precipitación, área, tipo y uso del suelo.

De manera específica, la aportación de sedimentos de la cuenca Gera, expresada en toneladas por metro cúbico al año ($t/m^3/año$), fue estimada a partir de la formulación empírica de Dendy Bolton (Morris y Fan 1998). Debido a que la cuenca del Gera presenta una precipitación mayor a 508 mm, se utilizó la siguiente ecuación (A6.1):

$$\frac{S}{S_R} = C_2 \times e^{(-0.11Q/Q_R)} [1.43 - 0.26 \times \text{LOG} \left(\frac{A}{A_R} \right)] \quad (\text{A.6.1})$$

Donde S es la cantidad (o producción) de sedimento específico, en $t/km^2/año$, S_R es una cantidad de sedimento de referencia ($576 t/km^2/año$), A es el área de la cuenca en km^2 , A_R es el valor de referencia para las áreas de cuenca ($2.59 km^2$), C_2 es una constante que equivale a 0.417, Q_R es el valor de referencia de escorrentía ($508 mm/año$) y Q es la escorrentía media anual de la cuenca, en $mm/año$. Los valores de referencia y la constante son ya establecida la formulación empírica de Dendy Bolton (Morris y Fan 1998).

Para estimar el valor de Q, se utilizó el método SARH (Hernández et al., 2002) mediante la aplicación de la ecuación (A.6.2).

$$Q_i = C_i \times PP_i \quad (\text{A.6.2})$$

Donde para cada año i, PP es la precipitación media en la cuenca Gera en mm y C es el coeficiente de escorrentía. Esta última variable es estimada mediante la ecuación (A.6.3) (Hernández et al. 2002), la misma que es válida para precipitaciones entre 350 y 2250 mm anuales. La precipitación de la cuenca fue obtenida de los valores registrados en la estación meteorológica Jepelacio de SENAMHI, y el valor anual promedio se encuentra dentro del rango válido para el uso de la ecuación (A.6.3).

$$C = k \times \frac{PP-250}{2000} + \frac{k-0.15}{1.50} \quad (\text{A.6.3})$$

Donde k es un parámetro que depende del tipo y uso del suelo (o cubierta vegetal), conforme a valores establecidos para el método SARH (Hernández et al., 2002). En la investigación se utilizó el valor 0.26, considerando que la cuenca está cubierta de bosque entre 25 al 50 por ciento de su superficie y que el suelo es medianamente permeable de acuerdo con lo mostrado en la siguiente Tabla:

Valores del parámetro k según el método SARH

Uso de suelo (o cubierta vegetal)	Tipo de suelo		
	A	B	C
Cultivos			
En hilera	0.24	0.27	0.30
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.30
Granos pequeños	0.24	0.27	0.30
Pastizal (porcentaje de suelo cubierto/pastoreo)			
Más del 75 por ciento / poco	0.14	0.20	0.28
Del 50 al 75 por ciento / regular	0.20	0.24	0.30
Menos del 50 por ciento / mucho	0.24	0.28	0.30
Bosque			
Cubierto más del 75 por ciento	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75 por ciento	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50 por ciento	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25 por ciento	0.22	0.28	0.30
Otros usos:			
Pradera permanente	0.18	0.24	0.30
Barbecho, áreas incultas o desnudas	0.26	0.26	0.30
Cascos y zonas con edificaciones	0.26	0.29	0.32
Caminos (incluyendo derecho de vía)	0.27	0.30	0.33

Nota: Tipos de suelo: (a) suelos muy permeables, o tipo A, tales como arenas profundas y loes poco compactos; (b) suelos medianamente permeables, tipo B, como las arenas de mediana profundidad, loes más compactos y terrenos migajosos; y (c) suelos casi impermeables, tipo C, como el caso de arenas y loes muy delgados (sobre capas impermeables) así como arcillas.

FUENTE: Hernández et al. (2002)

A partir de esta información se analizó la variación temporal de la producción de sedimentos de la cuenca del río Gera.

Anexo 7: Estimación de variable dicotómica SEC.

		MESES											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Años	2006	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
	2007	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
	2008	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
	2009	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
	2010	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
	2011	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
	2012	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
	2013	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
	2014	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0

FUENTE: Elaboración propia en base a Rojas (2014).

Anexo 8. Estimación de variable cualitativa DESC.

		MESES											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Años	2006	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2007	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2008	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
	2009	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	2010	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	2011	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
	2012	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	2013	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	2014	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4

Fuente: Elaboración propia en base a ELOR (2016a; 2008; 2016b; 2015).

Anexo 9: Pérdida de bosque, bosque remanente y tasa de deforestación del departamento de San Martín y la cuenca del Gera.

Área	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2006-2014
<i>Pérdida de bosque¹</i>														
Departamento San Martín (Km ²)	342.53	151.73	371.18	177.72	392.83	348.82	250.49	291.13	225.17	264.00	221.01	205.89	125.01	2,473.1
Provincia Moyobamba (Km ²)	47.15	18.85	62.01	22.18	46.75	78.88	42.97	52.11	36.56	29.85	20.39	17.71	10.72	390.15
Distritos Jepelacio	6.32	1.48	6.08	1.33	4.47	4.56	1.02	2.10	2.18	3.15	1.69	1.94	0.12	26.37
Distritos San Martín	13.30	2.49	7.15	2.80	7.06	7.25	3.45	5.71	6.37	5.80	2.75	3.68	0.31	48.09
Cuenca Gera (Km ²)	-	1.08	2.89	0.82	3.28	1.34	0.30	0.75	0.79	1.02	-	-	-	12.27
<i>Bosque remanente</i>														
San Martín (Km ²)	36,684.1	36,532.4	36,161.2	35,983.5	35,590.7	35,241.8	34,991.4	34,700.2	34,475.1	34,211.1	33,990.1	33,784.2	33,659.2	-
Moyobamba (Km ²)	2,843.7	2,824.8	2,762.8	2,740.6	2,693.9	2,615.0	2,572.0	2,519.9	2,483.4	2,453.5	2,433.1	2,415.4	2,404.7	
Distritos Jepelacio	157.69	156.21	150.13	148.80	144.33	139.77	138.75	136.66	134.47	131.32	129.63	127.70	127.58	-
Distrito San Martín	407.03	404.54	397.39	394.59	387.53	380.28	376.82	371.11	364.74	358.94	356.20	352.52	352.21	
Cuenca Gera (Km ²)	67.61	66.53	63.64	62.82	59.54	58.20	57.90	57.15	56.36	55.34	-	-	-	-
<i>Tasa de deforestación</i>														
San Martín	-	0.41%	1.02%	0.49%	1.09%	0.98%	0.71%	0.83%	0.65%	0.77%	0.65%	0.61%	0.4%	0.8%
Moyobamba (Km ²)		0.66	2.20	0.80	1.71	2.93	1.64	2.03	1.45	1.20	0.83	0.73	0.4	1.6
Distritos Jepelacio	-	0.94%	1.77%	0.71%	1.79%	1.87%	0.91%	1.52%	1.72%	1.59%	1.28%	1.49%	0.09%	1.4%
Distritos San Martín		0.61%	1.77%	0.71%	1.79%	1.87%	0.91%	1.52%	1.72%	1.59%	0.76%	1.03%	0.09%	1.4%
Cuenca Gera (Km ²)	-	1.60	4.35	1.28	5.22	2.25	0.52	1.29	1.38	1.81	-	-	-	2.2

Notas: (1) Superficie de pérdida de bosque monitoreado anualmente, (2) Cuencas priorizadas en el estudio de cuencas pares

FUENTE: Minam y PNCB (s.f), Gammie *et al.* (2016), García (2007) y Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (2018).

Anexo 10: Análisis de estacionalidad: Prueba de Raíz cuadrada.

Null Hypothesis: ENG has a unit root
 Exogenous: Constant, Linear Trend
 Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=11)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-3.899525	0.0159
Test critical values:		
1por ciento level	-4.063233	
5por ciento level	-3.460516	
10por ciento level	-3.156439	

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation
 Dependent Variable: D(ENG)
 Method: Least Squares
 Date: 12/22/16 Time: 10:20
 Sample (adjusted): 2006M02 2014M12
 Included observations: 90 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
ENG(-1)	-0.304955	0.078203	-3.899525	0.0002
C	968715.2	276719.1	3.500717	0.0007
@TREND(2006M01)	-896.4717	2649.523	-0.338352	0.7359
R-squared	0.149740	Mean dependent var		53718.31
Adjusted R-squared	0.130194	S.D. dependent var		845805.3
S.E. of regression	788826.6	Akaike info criterion		30.02725
Sum squared resid	5.41E+13	Schwarz criterion		30.11057
Log likelihood	-1348.226	Hannan-Quinn criter.		30.06085
F-statistic	7.660845	Durbin-Watson stat		1.743398
Prob(F-statistic)	0.000862			

FUENTE: Elaboración propia con el programa Eviews10.

Null Hypothesis: PP has a unit root
 Exogenous: Constant, Linear Trend
 Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=12)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-7.913517	0.0000
Test critical values:		
1por ciento level	-4.046072	
5por ciento level	-3.452358	
10por ciento level	-3.151673	

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation
 Dependent Variable: D(PP)
 Method: Least Squares
 Date: 12/22/16 Time: 10:27
 Sample (adjusted): 2006M02 2014M12
 Included observations: 107 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
PP(-1)	-0.763553	0.096487	-7.913517	0.0000
C	76.06015	15.98649	4.757776	0.0000
@TREND(2006M01)	0.251827	0.201519	1.249646	0.2142
R-squared	0.376388	Mean dependent var		0.945607
Adjusted R-squared	0.364395	S.D. dependent var		80.26991
S.E. of regression	63.99504	Akaike info criterion		11.18313
Sum squared resid	425918.0	Schwarz criterion		11.25806
Log likelihood	-595.2972	Hannan-Quinn criter.		11.21350
F-statistic	31.38515	Durbin-Watson stat		1.986671
Prob(F-statistic)	0.000000			

FUENTE: Elaboración propia con el programa Eviews10.

Null Hypothesis: TMAX has a unit root
 Exogenous: Constant, Linear Trend
 Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=12)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-3.848342	0.0177
Test critical values:		
1por ciento level	-4.046072	
5por ciento level	-3.452358	
10por ciento level	-3.151673	

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.
 Augmented Dickey-Fuller Test Equation
 Dependent Variable: D(TMAX)
 Method: Least Squares
 Date: 12/22/16 Time: 10:30
 Sample (adjusted): 2006M02 2014M12
 Included observations: 107 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
TMAX(-1)	-0.246890	0.064155	-3.848342	0.0002
C	6.988626	1.812347	3.856119	0.0002
@TREND(2006M01)	-0.002334	0.002327	-1.003270	0.3181
R-squared	0.125358	Mean dependent var		-0.002653
Adjusted R-squared	0.108538	S.D. dependent var		0.774246
S.E. of regression	0.731022	Akaike info criterion		2.238891
Sum squared resid	55.57692	Schwarz criterion		2.313830
Log likelihood	-116.7807	Hannan-Quinn criter.		2.269270
F-statistic	7.452890	Durbin-Watson stat		1.923483
Prob(F-statistic)	0.000944			

FUENTE: Elaboración propia con el programa Eviews10.

Null Hypothesis: TMIN has a unit root
 Exogenous: Constant, Linear Trend
 Lag Length: 11 (Automatic - based on SIC, maxlag=12)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-0.782552	0.9631
Test critical values:		
1por ciento level	-4.056461	
5por ciento level	-3.457301	
10por ciento level	-3.154562	

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation
 Dependent Variable: D(TMIN)
 Method: Least Squares
 Date: 12/22/16 Time: 10:33
 Sample (adjusted): 2007M01 2014M12
 Included observations: 96 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
TMIN(-1)	-0.152718	0.195154	-0.782552	0.4361
D(TMIN(-1))	-0.457244	0.211651	-2.160373	0.0337
D(TMIN(-2))	-0.296441	0.203095	-1.459618	0.1482
D(TMIN(-3))	-0.317454	0.173114	-1.833790	0.0703
D(TMIN(-4))	-0.538759	0.156165	-3.449935	0.0009
D(TMIN(-5))	-0.490591	0.156833	-3.128113	0.0024
D(TMIN(-6))	-0.419953	0.150675	-2.787134	0.0066
D(TMIN(-7))	-0.324243	0.133830	-2.422788	0.0176
D(TMIN(-8))	-0.531306	0.112304	-4.730948	0.0000
D(TMIN(-9))	-0.691470	0.112289	-6.157970	0.0000
D(TMIN(-10))	-0.418401	0.126065	-3.318923	0.0013
D(TMIN(-11))	-0.253220	0.112295	-2.254945	0.0268
C	2.644919	3.604764	0.733729	0.4652
@TREND(2006M01)	-0.000480	0.003613	-0.132981	0.8945
R-squared	0.571808	Mean dependent var		-0.017137
Adjusted R-squared	0.503924	S.D. dependent var		0.786383
S.E. of regression	0.553870	Akaike info criterion		1.790265
Sum squared resid	25.15531	Schwarz criterion		2.164232
Log likelihood	-71.93270	Hannan-Quinn criter.		1.941428
F-statistic	8.423314	Durbin-Watson stat		1.966960
Prob(F-statistic)	0.000000			

FUENTE: Elaboración propia con el programa Eviews10.

Null Hypothesis: D(TMIN) has a unit root
 Exogenous: Constant, Linear Trend
 Lag Length: 10 (Automatic - based on SIC, maxlag=12)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-8.509522	0.0000

Test critical values:	1por ciento level	-4.056461
	5por ciento level	-3.457301
	10por ciento level	-3.154562

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(TMIN,2)

Method: Least Squares

Date: 12/22/16 Time: 10:33

Sample (adjusted): 2007M01 2014M12

Included observations: 96 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
D(TMIN(-1))	-6.615196	0.777387	-8.509522	0.0000
D(TMIN(-1),2)	5.015064	0.705671	7.106805	0.0000
D(TMIN(-2),2)	4.589113	0.615163	7.459996	0.0000
D(TMIN(-3),2)	4.158995	0.556810	7.469329	0.0000
D(TMIN(-4),2)	3.518545	0.514216	6.842543	0.0000
D(TMIN(-5),2)	2.936119	0.445937	6.584149	0.0000
D(TMIN(-6),2)	2.435481	0.366431	6.646497	0.0000
D(TMIN(-7),2)	2.043846	0.297022	6.881123	0.0000
D(TMIN(-8),2)	1.458270	0.250319	5.825648	0.0000
D(TMIN(-9),2)	0.722622	0.196002	3.686815	0.0004
D(TMIN(-10),2)	0.271666	0.109537	2.480139	0.0152
C	-0.173995	0.135505	-1.284044	0.2027
@TREND(2006M01)	0.001841	0.002058	0.894649	0.3736
R-squared	0.784219	Mean dependent var		-0.006790
Adjusted R-squared	0.753022	S.D. dependent var		1.111891
S.E. of regression	0.552575	Akaike info criterion		1.776872
Sum squared resid	25.34317	Schwarz criterion		2.124127
Log likelihood	-72.28984	Hannan-Quinn criter.		1.917238
F-statistic	25.13743	Durbin-Watson stat		1.971012
Prob(F-statistic)	0.000000			

FUENTE: Elaboración propia con el programa Eviews10.

Null Hypothesis: D(TMIN) has a unit root

Exogenous: Constant, Linear Trend

Lag Length: 10 (Automatic - based on SIC, maxlag=12)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-8.509522	0.0000
Test critical values:		
1por ciento level	-4.056461	
5por ciento level	-3.457301	
10por ciento level	-3.154562	

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation
 Dependent Variable: D(TMIN,2)
 Method: Least Squares
 Date: 12/22/16 Time: 10:33
 Sample (adjusted): 2007M01 2014M12
 Included observations: 96 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
D(TMIN(-1))	-6.615196	0.777387	-8.509522	0.0000
D(TMIN(-1),2)	5.015064	0.705671	7.106805	0.0000
D(TMIN(-2),2)	4.589113	0.615163	7.459996	0.0000
D(TMIN(-3),2)	4.158995	0.556810	7.469329	0.0000
D(TMIN(-4),2)	3.518545	0.514216	6.842543	0.0000
D(TMIN(-5),2)	2.936119	0.445937	6.584149	0.0000
D(TMIN(-6),2)	2.435481	0.366431	6.646497	0.0000
D(TMIN(-7),2)	2.043846	0.297022	6.881123	0.0000
D(TMIN(-8),2)	1.458270	0.250319	5.825648	0.0000
D(TMIN(-9),2)	0.722622	0.196002	3.686815	0.0004
D(TMIN(-10),2)	0.271666	0.109537	2.480139	0.0152
C	-0.173995	0.135505	-1.284044	0.2027
@TREND(2006M01)	0.001841	0.002058	0.894649	0.3736

R-squared	0.784219	Mean dependent var	-0.006790
Adjusted R-squared	0.753022	S.D. dependent var	1.111891
S.E. of regression	0.552575	Akaike info criterion	1.776872
Sum squared resid	25.34317	Schwarz criterion	2.124127
Log likelihood	-72.28984	Hannan-Quinn criter.	1.917238
F-statistic	25.13743	Durbin-Watson stat	1.971012
Prob(F-statistic)	0.000000		

Fuente: Cálculos realizados en Eviews10.

Null Hypothesis: C5_15 has a unit root
 Exogenous: Constant, Linear Trend
 Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=11)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-4.117193	0.0085
Test critical values:		
1por ciento level	-4.063233	
5por ciento level	-3.460516	
10por ciento level	-3.156439	

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation
 Dependent Variable: D(C5_15)
 Method: Least Squares
 Date: 12/22/16 Time: 11:20
 Sample (adjusted): 2006M02 2014M12
 Included observations: 90 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C5_15(-1)	-0.340910	0.082801	-4.117193	0.0001
C	6.577638	2.332067	2.820518	0.0059
@TREND(2006M01)	-5.83E-05	0.024388	-0.002390	0.9981

R-squared	0.163426	Mean dependent var	-0.444444
Adjusted R-squared	0.144194	S.D. dependent var	7.838412
S.E. of regression	7.251296	Akaike info criterion	6.833003
Sum squared resid	4574.573	Schwarz criterion	6.916330
Log likelihood	-304.4851	Hannan-Quinn criter.	6.866605
F-statistic	8.497785	Durbin-Watson stat	1.765968
Prob(F-statistic)	0.000426		

FUENTE: Elaboración propia con el programa Eviews10.

Null Hypothesis: EFILC has a unit root
 Exogenous: Constant, Linear Trend
 Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=12)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-5.228017	0.0002
Test critical values:		
1por ciento level	-4.060874	
5por ciento level	-3.459397	
10por ciento level	-3.155786	

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation
 Dependent Variable: D(EFILC)
 Method: Least Squares
 Date: 12/22/16 Time: 11:26
 Sample (adjusted): 2006M02 2014M12
 Included observations: 92 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
EFILC(-1)	-0.467945	0.089507	-5.228017	0.0000
C	0.380852	0.075864	5.020197	0.0000
@TREND(2006M01)	0.000328	0.000230	1.426641	0.1572

R-squared	0.236172	Mean dependent var	-0.003338
Adjusted R-squared	0.219008	S.D. dependent var	0.077840
S.E. of regression	0.068790	Akaike info criterion	-2.483451
Sum squared resid	0.421154	Schwarz criterion	-2.401219
Log likelihood	117.2387	Hannan-Quinn criter.	-2.450261
F-statistic	13.75923	Durbin-Watson stat	2.057296
Prob(F-statistic)	0.000006		

FUENTE: Elaboración propia con el programa Eviews10.

Null Hypothesis: L has a unit root
 Exogenous: Constant, Linear Trend
 Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=11)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-4.250472	0.0057

Test critical values:	1por ciento level	-4.063233
	5por ciento level	-3.460516
	10por ciento level	-3.156439

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(L)

Method: Least Squares

Date: 12/22/16 Time: 11:28

Sample (adjusted): 2006M02 2014M12

Included observations: 90 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
L(-1)	-0.345871	0.081372	-4.250472	0.0001
C	419.8500	105.4683	3.980817	0.0001
@TREND(2006M01)	-0.845296	0.768623	-1.099753	0.2745
R-squared	0.172159	Mean dependent var		11.26011
Adjusted R-squared	0.153128	S.D. dependent var		242.4831
S.E. of regression	223.1466	Akaike info criterion		13.68630
Sum squared resid	4332113.	Schwarz criterion		13.76963
Log likelihood	-612.8835	Hannan-Quinn criter.		13.71990
F-statistic	9.046335	Durbin-Watson stat		1.931293
Prob(F-statistic)	0.000270			

FUENTE: Elaboración propia con el programa Eviews10.

Null Hypothesis: CF has a unit root

Exogenous: Constant, Linear Trend

Lag Length: 1 (Automatic - based on SIC, maxlag=12)

	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-1.945719	0.6235
Test critical values:		
1por ciento level	-4.046925	
5por ciento level	-3.452764	
10por ciento level	-3.151911	

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(CF)

Method: Least Squares

Date: 12/22/16 Time: 11:30

Sample (adjusted): 2006M03 2014M12

Included observations: 106 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
CF(-1)	-0.007264	0.003733	-1.945719	0.0544
D(CF(-1))	0.886419	0.045605	19.43672	0.0000
C	0.462789	0.249989	1.851236	0.0670

@TREND(2006M01)	-0.000688	0.000457	-1.504170	0.1356
R-squared	0.830735	Mean dependent var	-0.114050	
Adjusted R-squared	0.825756	S.D. dependent var	0.081296	
S.E. of regression	0.033935	Akaike info criterion	-3.891723	
Sum squared resid	0.117463	Schwarz criterion	-3.791216	
Log likelihood	210.2613	Hannan-Quinn criter.	-3.850987	
F-statistic	166.8683	Durbin-Watson stat	1.965122	
Prob(F-statistic)	0.000000			

FUENTE: Elaboración propia con el programa Eviews10.

Anexo 11: Estadísticas descriptivas de las variables explicativas inicialmente propuesta de la producción de energía hidroeléctrica de la CH Gera

	LOG(ENG_SA)	LOG(PP_SA)	LOG(TMAX_SA)	LOG(TMIN_SA)	LOG(CF)	LOG(SDM)	LOG(C5_15_SA)	LOG(EFILC)	LOG(L_SA)	SEC	DESC
Mean	14.85175	4.706099	3.323244	2.865283	4.098496	9.875032	2.947349	-0.156722	6.938914	0.260000	1.180000
Median	14.89504	4.776419	3.328524	2.868443	4.074423	9.876201	3.064064	-0.161369	6.989580	0.000000	1.000000
Maximum	15.15132	5.647590	3.399969	2.934470	4.212440	9.899235	3.719246	-0.010050	7.412421	1.000000	3.000000
Minimum	14.15868	2.902986	3.181365	2.765311	4.013527	9.838506	1.090861	-0.331794	5.919506	0.000000	0.000000
Std. Dev.	0.204110	0.418520	0.037508	0.038220	0.062126	0.012370	0.418084	0.095768	0.234064	0.440844	0.925290
Skewness	-1.480921	-1.090401	-1.622298	-0.470279	0.434719	-0.551022	-1.640615	-0.034361	-1.470741	1.094306	0.097987
Kurtosis	5.124818	5.729633	6.575744	2.653036	1.782244	3.195833	6.521075	1.711839	7.133355	2.197505	1.919645
Jarque-Bera	55.36399	50.86165	97.13895	4.187646	9.328562	5.220223	96.51850	6.933676	107.2372	22.64174	5.023218
Probability	0.000000	0.000000	0.000000	0.123215	0.009426	0.073526	0.000000	0.031216	0.000000	0.000012	0.081138
Sum	1485.175	470.6099	332.3244	286.5283	409.8496	987.5032	294.7349	-15.67220	693.8914	26.00000	118.0000
Sum Sq. Dev.	4.124421	17.34072	0.139277	0.144614	0.382106	0.015149	17.30463	0.907981	5.423809	19.24000	84.76000
Observations	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Anexo 12: Resultados de la primera estimación del modelo econométrico para la forma funcional tipo Cobb Douglas.

Dependent Variable: LOG(ENG_SA)

Method: Least Squares

Date: 12/25/19 Time: 23:36

Sample: 2006M01 2014M12

Included observations: 100

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	10.73131	3.428607	3.129932	0.0024
LOG(PP_SA)	0.156448	0.047862	3.268752	0.0016
LOG(TMAX_SA)	-2.181896	0.540891	-4.033891	0.0001
LOG(TMIN_SA)	1.166711	0.752738	1.549956	0.1249
LOG(CF)	1.767853	0.727700	2.429370	0.0172
LOG(C5_15_SA)	-0.093492	0.057466	-1.626915	0.1075
LOG(EFI)	-0.750181	0.275084	-2.727096	0.0078
LDESC	0.292623	0.080710	3.625623	0.0005
SEC	-0.025569	3.264790	-0.007832	0.9938
LOG(PP_SA)*SEC	-0.095517	0.075223	-1.269797	0.2076
LOG(TMAX_SA)*SEC	-0.211627	0.824510	-0.256670	0.7981
LOG(TMIN_SA)*SEC	-1.336909	1.029522	-1.298573	0.1976
LOG(CF)*SEC	1.258535	0.677764	1.856894	0.0668
LOG(C5_15_SA)*SEC	-0.019850	0.080999	-0.245064	0.8070
LOG(EFI)*SEC	0.527648	0.351321	1.501900	0.1368
R-squared	0.677335	Mean dependent var	14.85175	
Adjusted R-squared	0.624190	S.D. dependent var	0.204110	
S.E. of regression	0.125126	Akaike info criterion	-1.181507	
Sum squared resid	1.330808	Schwarz criterion	-0.790732	
Log likelihood	74.07536	Hannan-Quinn criter.	-1.023353	
F-statistic	12.74506	Durbin-Watson stat	0.654369	
Prob(F-statistic)	0.000000			

FUENTE: Elaboración propia con el programa Eviews10.

Anexo 13: Resultados de la primera estimación del modelo econométrico para la forma funcional tipo Translogarítmica.

Dependent Variable: LOG(ENG_SA)

Method: Least Squares

Date: 12/26/19 Time: 01:03

Sample: 2006M01 2014M12

Included observations: 100

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	126.9312	241.4732	0.525653	0.6009
LOG(PP_SA)	-5.564658	7.981188	-0.697222	0.4881
LTMAX_SA	80.71085	64.67823	1.247883	0.2165
LOG(TMIN_SA)	-85.14062	94.12895	-0.904510	0.3690
LOG(CF)	-45.70890	82.88678	-0.551462	0.5832
LOG(C5_15_SA)	-6.847229	11.72059	-0.584205	0.5611
LOG(EFI)	45.18424	33.48707	1.349304	0.1819
SEC	2.179100	6.331186	0.344185	0.7318
LTMAX_SA*LPP_SA	1.645897	1.760563	0.934870	0.3533
LOG(TMIN_SA)*LPP_SA	-1.748340	2.049282	-0.853147	0.3967
LCF*LPP_SA	1.297109	1.397577	0.928113	0.3567
LOG(EFI)*LPP_SA	-0.170254	0.572892	-0.297183	0.7673
LOG(TMIN_SA)*LTMAX_SA	-2.697977	19.78476	-0.136366	0.8919
LCF*LTMAX_SA	-1.433115	20.35870	-0.070393	0.9441
LOG(C5_15_SA)*LTMAX_SA	1.822918	3.113022	0.585578	0.5602
LOG(EFI)*LTMAX_SA	-10.46813	8.289173	-1.262868	0.2111
LCF*LOG(TMIN_SA)	26.48606	25.35644	1.044550	0.3000
LOG(C5_15_SA)*LOG(TMIN_SA)	1.144930	1.727557	0.662745	0.5098
LOG(EFI)*LOG(TMIN_SA)	-7.246614	9.904139	-0.731675	0.4670
LOG(C5_15_SA)*LCF	-0.625682	1.390913	-0.449835	0.6543
LOG(EFI)*LCF	3.028601	6.318705	0.479307	0.6333
LOG(EFI)*LOG(C5_15_SA)	-0.916907	1.168455	-0.784717	0.4354
LPP_SA*SEC	-0.114833	0.112606	-1.019778	0.3116
LTMAX_SA*SEC	-1.501754	1.536598	-0.977324	0.3320
LOG(TMIN_SA)*SEC	0.029405	1.582528	0.018581	0.9852
LOG(CF)*SEC	0.971116	0.949648	1.022606	0.3102
LOG(C5_15_SA)*SEC	-0.185427	0.112916	-1.642162	0.1053
LOG(EFI)*SEC	0.916133	0.463707	1.975674	0.0524
LPP_SA*LPP_SA	-0.017600	0.071136	-0.247415	0.8054
LTMAX_SA*LTMAX_SA	-12.64070	11.03966	-1.145026	0.2563
LOG(TMIN_SA)*LOG(TMIN_SA)	-1.720101	17.97264	-0.095707	0.9240
LOG(CF)*LOG(CF)	-3.652395	9.575006	-0.381451	0.7041
LOG(C5_15_SA)*LOG(C5_15_SA)	-0.035476	0.088866	-0.399211	0.6910
LOG(EFI)*LOG(EFI)	-1.768988	2.500240	-0.707527	0.4817
R-squared	0.720604	Mean dependent var	14.85175	
Adjusted R-squared	0.580906	S.D. dependent var	0.204110	
S.E. of regression	0.132136	Akaike info criterion	-0.945493	
Sum squared resid	1.152347	Schwarz criterion	-0.059735	
Log likelihood	81.27464	Hannan-Quinn criter.	-0.587011	
F-statistic	5.158299	Durbin-Watson stat	0.682490	
Prob(F-statistic)	0.000000			

FUENTE: Elaboración propia con el programa Eviews10.

Anexo 14. Resultados de la primera estimación del modelo econométrico para la forma funcional tipo Cuadrática.

Dependent Variable: ENG_SA

Method: Least Squares

Date: 12/27/19 Time: 01:27

Sample: 2006M01 2014M12

Included observations: 100

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	7665491.	26734081	0.286731	0.7750
PP_SA	4288.566	2980.835	1.438713	0.1538
TMAX_SA	1744264.	1201423.	1.451832	0.1501
TMIN_SA	-3391072.	2337068.	-1.450994	0.1504
CF	93586.86	416531.2	0.224682	0.8228
C5_15_SA	-14608.18	22048.34	-0.662552	0.5094
EFI	3595059.	10502356	0.342310	0.7329
PP_SA^2	-10.92042	10.31659	-1.058530	0.2927
TMAX_SA^2	-36075.47	22285.77	-1.618767	0.1091
TMIN_SA^2	98311.87	67360.09	1.459497	0.1480
CF^2	-742.2787	3376.311	-0.219849	0.8265
C5_15_SA^2	-194.8529	532.4257	-0.365972	0.7153
EFI^2	-2894611.	6062455.	-0.477465	0.6342
R-squared	0.664249	Mean dependent var		2871816.
Adjusted R-squared	0.617938	S.D. dependent var		511420.9
S.E. of regression	316115.1	Akaike info criterion		28.28634
Sum squared resid	8.69E+12	Schwarz criterion		28.62501
Log likelihood	-1401.317	Hannan-Quinn criter.		28.42341
F-statistic	14.34337	Durbin-Watson stat		0.656826
Prob(F-statistic)	0.000000			

FUENTE: Elaboración propia con el programa Eviews10.

Anexo 15: Análisis de heterocedasticidad: Prueba White.

Heteroskedasticity Test: White
Null hypothesis: Homoskedasticity

F-statistic	1.683309	Prob. F(14,93)	0.0723
Obs*R-squared	21.83447	Prob. Chi-Square(14)	0.0821
Scaled explained SS	24.15597	Prob. Chi-Square(14)	0.0439

Test Equation:
Dependent Variable: RESID^2
Method: Least Squares
Date: 12/27/19 Time: 06:17
Sample: 2006M01 2014M12
Included observations: 108

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-158.6778	157.8714	-1.005108	0.3175
LOG(PP_SA)^2	-0.002119	0.013129	-0.161424	0.8721
LOG(PP_SA)*LOG(TMAX_SA)	-0.184233	0.248182	-0.742331	0.4598
LOG(PP_SA)*LOG(CF)	-0.303656	0.453969	-0.668891	0.5052
LOG(PP_SA)*LDESC	-0.043510	0.057817	-0.752546	0.4536
LOG(PP_SA)	1.909593	2.253427	0.847417	0.3989
LOG(TMAX_SA)^2	0.522076	1.964126	0.265806	0.7910
LOG(TMAX_SA)*LOG(CF)	-7.941491	5.483611	-1.448223	0.1509
LOG(TMAX_SA)*LDESC	-1.357438	0.663851	-2.044793	0.0437
LOG(TMAX_SA)	31.09715	25.38165	1.225183	0.2236
LOG(CF)^2	-2.596947	7.343286	-0.353649	0.7244
LOG(CF)*LDESC	-0.433958	1.723072	-0.251852	0.8017
LOG(CF)	49.08994	65.58274	0.748519	0.4560
LDESC^2	-0.043881	0.121389	-0.361494	0.7186
LDESC	6.501243	7.913467	0.821542	0.4134
R-squared	0.202171	Mean dependent var	0.019244	
Adjusted R-squared	0.082068	S.D. dependent var	0.030155	
S.E. of regression	0.028891	Akaike info criterion	-4.122343	
Sum squared resid	0.077625	Schwarz criterion	-3.749824	
Log likelihood	237.6065	Hannan-Quinn criter.	-3.971300	
F-statistic	1.683309	Durbin-Watson stat	1.911066	
Prob(F-statistic)	0.072341			

FUENTE: Elaboración propia con el programa Eviews10.

Anexo 16. Análisis de multicolinealidad: Matriz de correlación de las variables de la función de producción.

	LOG(ENG_...	LOG(PP_SA)	LOG(TMAX...	LOG(CF)	LDESC
LOG(ENG_...	1	0.48666157...	-0.5443078...	0.08720154...	0.03929248...
LOG(PP_SA)	0.48666157...	1	-0.3031471...	-0.1694219...	0.17079507...
LOG(TMAX...	-0.5443078...	-0.3031471...	1	0.15966641...	-0.1723330...
LOG(CF)	0.08720154...	-0.1694219...	0.15966641...	1	-0.9351091...
LDESC	0.03929248...	0.17079507...	-0.1723330...	-0.9351091...	1

FUENTE: Elaboración propia con el programa Eviews10.

Anexo 17: Análisis de autocorrelación: Prueba Breusch-Godfrey Serial Correlation - LM.

Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:
Null hypothesis: No serial correlation at up to 2 lags

F-statistic	43.16769	Prob. F(2,101)	0.0000
Obs*R-squared	49.77288	Prob. Chi-Square(2)	0.0000

Test Equation:

Dependent Variable: RESID

Method: Least Squares

Date: 12/27/19 Time: 06:13

Sample: 2006M01 2014M12

Included observations: 108

Presample missing value lagged residuals set to zero.

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	1.349299	2.229091	0.605314	0.5463
LOG(PP_SA)	-0.047463	0.026623	-1.782752	0.0776
LOG(TMAX_SA)	0.104354	0.295970	0.352583	0.7251
LOG(CF)	-0.353099	0.469735	-0.751697	0.4540
LDESC	-0.038226	0.061238	-0.624220	0.5339
RESID(-1)	0.360388	0.089962	4.006025	0.0001
RESID(-2)	0.423902	0.092016	4.606819	0.0000
R-squared	0.460860	Mean dependent var		2.54E-15
Adjusted R-squared	0.428832	S.D. dependent var		0.139369
S.E. of regression	0.105329	Akaike info criterion		-1.600838
Sum squared resid	1.120513	Schwarz criterion		-1.426996
Log likelihood	93.44527	Hannan-Quinn criter.		-1.530352
F-statistic	14.38923	Durbin-Watson stat		1.867187
Prob(F-statistic)	0.000000			

FUENTE: Elaboración propia con el programa Eviews10.

Anexo 18: Análisis de correcta estimación del modelo: Prueba Ramsey RESET.

Ramsey RESET Test

Equation: A1COBBDOUGLAS2

Omitted Variables: Squares of fitted values

Specification: LOG(ENG_SA) C LOG(PP_SA) LOG(TMAX_SA)

LOG(CF)

	Value	df	Probability
t-statistic	3.150560	103	0.0021
F-statistic	9.926027	(1, 103)	0.0021
Likelihood ratio	9.936430	1	0.0016

F-test summary:

	Sum of Sq.	df	Mean Squares
Test SSR	0.218620	1	0.218620
Restricted SSR	2.487193	104	0.023915
Unrestricted SSR	2.268572	103	0.022025

LR test summary:

	Value
Restricted LogL	50.38737
Unrestricted LogL	55.35559

Unrestricted Test Equation:

Dependent Variable: LOG(ENG_SA)

Method: Least Squares

Date: 12/27/19 Time: 06:30

Sample: 2006M01 2014M12

Included observations: 108

HAC standard errors & covariance (Bartlett kernel, Newey-West fixed bandwidth = 5.0000)

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	710.9100	182.6985	3.891165	0.0002
LOG(PP_SA)	11.00613	2.864637	3.842069	0.0002
LOG(TMAX_SA)	-152.5515	39.69519	-3.843073	0.0002
LOG(CF)	43.78146	11.40674	3.838208	0.0002
FITTED^2	-1.906922	0.503572	-3.786788	0.0003

R-squared	0.506851	Mean dependent var	14.84037
Adjusted R-squared	0.487700	S.D. dependent var	0.207346
S.E. of regression	0.148408	Akaike info criterion	-0.932511
Sum squared resid	2.268572	Schwarz criterion	-0.808338
Log likelihood	55.35559	Hannan-Quinn criter.	-0.882163
F-statistic	26.46547	Durbin-Watson stat	0.776078
Prob(F-statistic)	0.000000	Wald F-statistic	16.76414
Prob(Wald F-statistic)	0.000000		

FUENTE: Elaboración propia con el programa Eviews10.