

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS
ESCUELA DE ECONOMÍA



PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:
“SISTEMA DE VALORACIÓN ECONÓMICA DEL RECURSO
GEOTÉRMICO COMO BASE PARA EL MINADO DE BITCOIN EN EL
SALVADOR”.

PRESENTADO POR: GRUPO # 11

Jairo Rafael Contreras Ramírez CR15081

Carlos Ernesto Vigil Pineda VP09006

DOCENTE ASESOR:

Msc. Jonnathan Moisés Salazar Serrano

JULIO, 2024

SAN SALVADOR, EL SALVADOR, CENTROAMÉRICA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

AUTORIDAD	GRADO ACADÉMICO, NOMBRES Y APELLIDOS
RECTOR/A	MSC. JUAN ROSA QUINTANILLA
SECRETARIO/A GENERAL	LIC. PEDRO ROSALIO ESCOBAR CASTANEDA
DECANO/A DE LA FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS	LICDA. CELINA AMAYA DE CALDERÓN
VICEDECANO/A DE LA FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS	MSC. NIXON ROGELIO HERNANDEZ VASQUEZ
SECRETARIO/A DE LA FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS	LIC. PEDRO JAVIER RIVAS MEJIA
DIRECTOR/A DE LA ESCUELA	MSC. PEDRO ANTONIO SALGUERO
COORDINADOR DEL PROCESO DE GRADUACIÓN DE ESCUELA	LIC. LUIS ALBERTO PARRILLAS RODRIGUEZ
DOCENTE ASESOR/A	MSC. JONNATHAN MOISÉS SALAZAR SERRANO
TRIBUNAL CALIFICADOR	LIC. EVELYN VERONICA HERNANDEZ LIC. SANDRA TERESA PEREZ AVELAR

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	I
RESUMEN EJECUTIVO.....	IV
INTRODUCCIÓN.....	VI
I. MARCO REFERENCIAL.....	1
1.1. Aspectos Generales de la Investigación.....	1
1.2. Marco Teórico-Conceptual	8
1.3. Marco Normativo y Legal.....	41
1.4. Marco Contextual.....	49
II. SISTEMA DE VALORACIÓN ECONÓMICA DEL RECURSO GEOTÉRMICO COMO BASE PARA EL MINADO DE BITCOIN EN EL SALVADOR.	53
2.1. Generalidades del Sujeto de Estudio.....	53
2.2. Desarrollo del Sistema de Valoración Económica del Recurso Geotérmico.....	55
2.3. Diagnóstico - Sistema de Valoración como Base para el Minado de Bitcoin ...	71
III. CONSIDERACIONES FINALES DE LA PROBLEMÁTICA EN CUESTIÓN .	85
3.1. Conclusiones	85
3.2. Recomendaciones.....	89
BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXOS	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Precio de mercado de energía promedio en El Salvador (Base en US\$/MWh) (Año 2021).....	41
Tabla 2. Parámetros de lectura de coeficiente de correlación de Pearson.....	66
Tabla 3. Parámetros de lectura de coeficiente de regresión	67
Tabla 4. Capacidad de minado de El Salvador al nivel actual de generación de energía geotérmica.	77
Tabla 5. Valor estimado de la Energía Geotérmica en términos de bitcoin 2021	78
Tabla 6. Valor estimado de la Energía Geotérmica en términos de bitcoin 2023	80
Tabla 7. Alternativas de uso del total de capacidad instalada de la Energía Geotérmica en El Salvador (2021).....	82

ÍNDICE DE ESQUEMAS E ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Límites de placas tectónicas y distribución de provincias geotérmicas ..	8
Esquema 1. Diagrama de flujo sobre técnicas de valoración económica.....	20
Ilustración 2. Proceso de la cadena de bloques en bitcoin	29
Ilustración 3. Manera gráfica de Modelo de Regresión Lineal Simple.....	62
Ilustración 4. Código de establecimiento de MCO en RStudio	64
Ilustración 5. Parámetros por medio de MCO en RStudio.....	65

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Proyección de emisiones de CO ₂ bitcoin (Año 2020-2080)	27
Gráfico 2. Inyección de energía neta por recurso e importaciones (Año 2020).....	28
Gráfico 3. Fluctuaciones del valor de bitcoin (Año 2022)	29
Gráfico 4. Dificultad de la red y el precio del bitcoin (Año 2022)	31
Gráfico 5. Inyección de energía neta por recurso e importaciones (Año 2020).....	39
Gráfico 6. Matriz energética por distribución-generación neta por recurso (Año 2022)	39
Gráfico 7. Diagrama de dispersión utilizando el método de mínimos cuadrados	61
Gráfico 8. Nube de puntos de observaciones de variables $Y \sim X$	63
Gráfico 9. Precios máximos del bitcoin (2009 - 2021)	72
Gráfica 10. Producción máxima de BTC por periodo halving.....	74
Gráfico 11. Valor de Energía Geotérmica en término de BTC (2021)	79
Gráfico 12. Valor de Energía Geotérmica en término de BTC (2023)	80
Gráfico 13. Alternativas de uso de la energía geotérmica en El Salvador (Producción Agrícola - Producción Bitcoin) - 2021	82
Gráfico 14. Diferencia entre alternativas de uso de Energía Geotérmica en El Salvador (Producción Agrícola - Producción Bitcoin) - 2021	83

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Costos y riesgos de un proyecto geotérmico en sus etapas de desarrollo	99
Anexo 2. Evolución de la capacidad geotérmica-eléctrica instalada en el mundo (2020)	99
Anexo 3. Plantas geotermoeléctricas en operación en el mundo (por zonas).....	100
Anexo 4. Esquema de funcionamiento simple de una cadena de bloques.....	100
Anexo 5. Mapa de potencial geotérmico de El Salvador (2021)	101
Anexo 6. Importaciones de energía, valor neto (% uso de energía)	101
Anexo 7. Precio Promedio de Mercado de Energía en ESA para el 2021 (US\$ / kWh)	102
Anexo 8. Configuración del sistema de generación y transmisión de electricidad (2018)....	102
Anexo 9. Estructura institucional del sector energético (2012).....	103
Anexo 10. Estructura general del sector energético (2016).....	103
Anexo 11. Interrelaciones institucionales en el ramo de geotermia (2012).....	104
Anexo 12. Base de datos producción agrícola (qq) y energía (Gw/h) (Años 1999 - 2021) ..	104
Anexo 13. Variable endógena y exógena aplicada en RStudio para diagrama de dispersión	105
Anexo 14. Cargado de librerías y base de datos en RStudio.	105
Anexo 16. Precios promedios de granos básicos El Salvador (2021).....	106
Anexo 17. Producción anual mundial de BTC dividido por periodo halving	107
Anexo 18. Precio histórico del BTC (2011 - 2021).....	107
Anexo 19. Lista de precios máximos del BTC (2009 - 2021)	108
Anexo 20. Una abstracción de El Salvador como minador 5% de BTC a nivel mundial (2009- 2021).	108

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

AIE	Agencia Internacional de la Energía (IEA por sus siglas en inglés)
BM	Banco Mundial
BCR	Banco Central de Reserva
BTC	Bitcoin
CEL	Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CNE	Consejo Nacional de Energía
DC	Defensoría del Consumidor
DIGESTYC	Dirección General de Estadísticas y Censos de El Salvador
EA	Economía Ambiental
EHPM	Encuesta de Hogares y Propósitos Múltiples
ESA	El Salvador
ETESAL	Empresa Transmisora de Electricidad de El Salvador
FAO	Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura
FINET	Fondo de Inversión en Electricidad y Telefonía
GOES	Gobierno de El Salvador
GW	Gigavatio
GWh	Gigavatio hora
IRENA	Agencia Internacional de Energías Renovables

KWh	Kilovatio hora
LaGeo	Geotérmica Salvadoreña
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
MCP	Método de Cambio de la Productividad
MER	Mercado Eléctrico Regional
MH	Ministerio de Hacienda
MINEC	Ministerio de Economía
MOP	Ministerio de Obras Públicas
MW	Megavatio
MWh	Megavatio hora
PAE	Programa de Ajuste Estructural / Producción Anual de Energía
SC	Superintendencia de Competencia
SIGET	Superintendencia de General de Electricidad y Telecomunicaciones
UT	Unidad de Transacciones
WEF	World Economic Forum (Foro Económico Mundial)

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la culminación de este trabajo de grado.

A Dios, por darme la fortaleza de culminar este logro y por ayudarme en todo mi camino profesional. Sin su guía y apoyo constante, este sueño no habría sido posible.

A mi madre María Inés, y mi padre René Contreras, por quienes estoy aquí y quienes me impulsaron de todas las formas posibles a cumplir mis sueños. Gracias por su amor, sacrificio y fe inquebrantable en mí. Su apoyo incondicional ha sido mi mayor motivación.

Finalmente, gracias a Marie por ser mi inspiración a culminar mis metas. Tu amor, comprensión y constante ánimo me han dado la fuerza necesaria para superar los momentos difíciles y alcanzar este importante hito en mi vida.

A todos ustedes, toda mi gratitud.

Jairo Contreras

No hubo ni habrá jamás en lenguas humanas, vocablo o expresión alguna, palabra con la que cabalmente agradecer a todos aquellos quienes, conscientes o no, contribuyeron con mucho o poco en esta modesta, más no menos noble gesta, que culmina en este trabajo de graduación.

A todo el cúmulo de azares, contingencias y demás factores, del ayer y del devenir, que bien o mal me han permitido llegar hasta aquí, siendo aun así plenamente consciente, de la entera y absoluta indiferencia e inconsciencia en la que estás fuerzas del cosmos operan sobre este mundo, en relación a mi particular existencia, sin que ello suponga no obstante no sentir un profundo dejo de agradecimiento por permitírseme forjar mi camino profesional en la hora final de esta jornada, en la que un sueño cobra vida... el sueño de ser titulado de economía.

A mi familia; a madre Lucia, a mi padre, y a mi tío Víctor, sin su esfuerzo, desafío, apoyo y sacrificio, estás palabras jamás habrían cruzado la barrera entre el ser y la nada; una victoria que palidece ante el ominoso espectáculo de bastedad que es el mundo, pero que igual se siente como derribar gigantes a una sola mano alzada. De ustedes aprendí, que no importa cuán pequeño sea el rincón de este planeta que ocupamos, siempre estamos en la obligación de mejorarlo. Su alegría me enseñó que no hay mayor alegría que poder ser razón de felicidad para otros.

A todos mis maestros, tanto buenos y malos, con los que viví el milagro de aprender, especial mención para el Lic. Reyes Luna, cuyo saber, siempre varias veces mucho mayor que el mío, hizo nacer en mí el vicio más feliz de todos, la avidez por adquirir más y mayores niveles de conocimiento. A Msc. Jonathan, asesor de este proceso y demás personas involucradas.

Al amor de mi vida, Vero, cuyo amor y compañía fueron y serán bálsamo y plutonio puro que me alivia y energiza a razones iguales, ayudándome a llegar a donde jamás creí, haciéndome sentir fuerzas que antes no sentí, brindándome la fe que en mí, en ocasiones y en la intimidad

de mi ser, no vi. Los momentos más duros, las noches más frías, las horas más sombrías, fueron más fáciles junto a ti.

Por último, a todos, a los que no me alcanzo el tiempo ni el espacio para nombrarlos, gracias... aunque un día indefectiblemente el mundo acabará, y el sol mismo sucumbirá a la marcha implacable del tiempo, aunque en ese aciago instante no quede nadie quien recuerde, nada cambiará lo mucho que a ustedes agradecimiento debí. Gracias.

Carlos Vigil

RESUMEN EJECUTIVO

- Tema de Investigación: “Sistema de Valoración Económica del Recurso Geotérmico como Base para el Minado de Bitcoin en El Salvador”.
- Orígenes de la Investigación: El presente estudio surge como una respuesta a la necesidad de establecer un sistema de valoración de los recursos geotérmicos de El Salvador, con el fin de determinar la idoneidad del uso de estos en la minería de bitcoin.
- Objetivos Trazados: Los objetivos específicos de este estudio son: determinar el valor del recurso geotérmico, como insumo del bien o servicio en que es empleado, por medio de la metodología escogida; estimar los niveles de productividad que generan las distintas alternativas de uso en consideración; mostrar la valoración ambiental que genera la mayor productividad de uso; fundamentar el por qué migrar hacia una matriz energética de fuentes de energía renovable.
- Metodología Utilizada: Se empleó el Método de Cambio en la Productividad, por medio de análisis comparativo de las distintas productividades calculadas entre los posibles usos

alternos considerados para el recurso geotérmico en este estudio, siendo la investigación de tipo descriptivo.

Resultados Obtenidos:

La información obtenida fue en parte gracias a: fuentes gubernamentales, académicas, así como de varias instituciones y organismos familiarizados con la energía geotérmica y el minado de bitcoin.

Conclusiones Generales

y

Recomendaciones:

El uso intensivo de recursos energéticos eléctricos por parte de la minería de bitcoin plantea un reto importante en la productividad del recurso geotérmico empleable en dicho uso; a la luz de los cálculos realizados por medio del Método de Cambio en la Productividad, y dado el requerimiento intensivo en consumo de energía eléctrica por parte del minado de bitcoin, así como la histórica tendencia de El Salvador de ser un importador neto de energía, se recomienda ampliar la matriz energética nacional, estimulando el empleo de energías verdes como la geotérmica, antes de considerar el uso de los recursos energéticos existentes (como la geotermia) en asignaciones alternativas.

INTRODUCCIÓN

La economía, ciencia dedicada al estudio de la conjunción entre recursos escasos y deseos ilimitados (desde un enfoque neoclásico), establece precios por medio del mercado con los cuales busca obtener las asignaciones más eficientes entre usos alternativos de los bienes y servicios en ella existentes. ¿Qué sucede cuando un bien, dada una determinada razón, el mercado no tiene forma alguna de asignarle un precio a su valor? La problemática de la falta de sistemas de valoración económica de los recursos ambientales salvadoreños, más específicamente para este caso en particular de los recursos geotérmicos, cobra importancia ante el desafío de emplearlos en aquella finalidad que reporte mayor bienestar al país, existiendo coyunturas en el que puede elegirse múltiples alternativas de uso, como es el caso del minado de criptomonedas como bitcoin o el consumo del sector productivo y residencial.

En base a lo anterior, se presentará de forma sistemática el establecimiento de un sistema de valoración para el recurso geotérmico, esto en miras para determinar con metodología científica si su aprovechamiento en el minado de bitcoin en El Salvador resulta ser la opción más óptima, bajo el criterio de productividad y eficiencia. Una de las principales razones que justifica la elección de la energía geotérmica como sujeto de estudio es debido al carácter estratégico que presenta como fuente de energía renovable de la matriz energética nacional, además de su relevancia dada la coyuntura política actual, en la que El Salvador se presenta como el primer país a nivel mundial en adoptar el uso de bitcoin como moneda de curso legal, planteándose como principal insumo para su generación, o minería, la utilización de la energía geotérmica disponible en el país.

La valoración económica del recurso ambiental geotérmico como insumo para la generación de energía eléctrica permitirá determinar un valor económico con el cual establecer un criterio con el que definir usos eficientes, entre los diversos usos alternativos posibles, buscando la opción más óptima desde un sentido económico para el beneficio del país. Desde

un enfoque neoclásico, los vacíos de información en el mercado o la inexistencia de mercados y precios son una condición necesaria para la asignación ineficiente de recursos. Los recursos ambientales en El Salvador han sido históricamente tratados de forma utilitaria y antropocéntrica, ocasionando vacíos de información en el establecimiento de sus precios, lo que los lleva a ser explotados o asignados de manera ineficiente según las coyunturas económicas y políticas del momento. Por tal motivo, el objetivo central de la investigación es establecer un sistema de valoración económica del recurso geotérmico salvadoreño, por medio del método de valoración directa de cambio en la productividad, para determinar el valor económico del recurso natural, en el marco del proyecto de minado de bitcoin en El Salvador.

Expuesto lo anterior, el Capítulo I abordará toda la conceptualización del tema agrupado en tres grandes bloques. El primero, el Marco Teórico Conceptual, constituido por toda la base científica teórica que permite el desarrollo de la investigación, en donde se presenta de forma ordenada cada uno de los conceptos centrales utilizados en la formulación de las hipótesis y los objetivos de la investigación que permiten conocer qué se entiende por sistema de valoración económica, sus alcances y limitaciones, así como las distintas metodologías que se pueden utilizar para su desarrollo, y a su vez, el análisis de la coyuntura económica y política relacionada al tema del bitcoin, su establecimiento como moneda de curso legal con sus posibles implicaciones en la demanda energética para el minado de criptomoneda utilizando fuentes de energía geotérmica.

El segundo bloque del primer capítulo mostrará el Marco Normativo y Legal que hace referencia a todo el ordenamiento jurídico que afecta al objeto de estudio, para en este caso: la Constitución de la República de El Salvador, la Ley General de Electricidad, Ley Bitcoin, y la Ley del Medio Ambiente. Finalmente, el tercer bloque muestra el marco contextual con el cual se hace una pequeña descripción del entorno cercano de las categorías, variables e indicadores tales como la propia energía geotérmica, el bitcoin como moneda y la valoración económica,

que finalmente ayudarán a verificar o constatar el estado de la problemática en estudio. De esta manera, es como quedará constituido el primer capítulo, cimentando el preámbulo a partir del cual se podrá pasar al análisis de la problemática que atañe a la finalidad de esta investigación.

El Capítulo II muestra el desarrollo del tema central acerca de la valoración económica, donde se comienza a realizar una breve descripción del sujeto de estudio para entender la situación actual en la que se encuentra El Salvador en lo referente a la energía geotérmica para la producción de electricidad, con la finalidad de conocer su importancia dentro de la matriz energética, todo lo anterior por medio de un diagnóstico. Así mismo, en este capítulo se desarrollará el enlace entre la energía geotérmica con el bitcoin, estableciendo así la importancia de realizar una medición de la demanda energética del proceso de minado. Teniendo en cuenta lo anterior, se procederá con el desarrollo de las ideas sobre los posibles requerimientos en insumos energéticos incurridos por el minado de bitcoin para posteriormente desarrollar el sistema de valoración económico por medio del Método del Cambio en la Productividad, donde se comparan los diferentes usos de la energía geotérmica; por otra parte, se observará los niveles de productividad obtenidos en un campo más tradicional como la producción agrícola, concretamente el cultivo de maíz (por decisión expresa del equipo investigador, al ser dicho bien un producto de consumo icónico a nivel nacional), y así determinar el uso que genera mayores niveles de productividad en relación al nivel de productividad obtenido por el proceso de minado de bitcoin.

Finalmente, el Capítulo III se encuentra dividido en dos bloques principales. En el primero se expone las consideraciones finales sobre la problemática, enunciando los resultados obtenidos a través de un resumen que destacará los puntos más importantes encontrados, luego del proceso de análisis e interpretación de la información obtenida por medio de la aplicación del sistema de valoración económica establecido para el recurso geotérmico. En el segundo bloque, se plantean las recomendaciones orientadas a proponer soluciones a la problemática

central de la investigación, así como también otros aspectos relacionados al tema de investigación, con la finalidad que el presente trabajo pueda incidir favorablemente en la realidad medio ambiental salvadoreña.

Como observación final, es necesario recalcar que con este esfuerzo se persigue demostrar que por medio de un sistema de valoración económica del recurso ambiental geotérmico salvadoreño es posible realizar aportaciones a los vacíos de información que el mercado energético nacional tiene para tales bienes y servicios, aportando así a usos más eficientes y a mejores asignaciones que se puedan realizar de los mismos (sirviendo a objetivos que redunden en un mayor beneficio nacional, como la migración, ampliación, y diversificación de la matriz energética nacional a fuentes de energías más ecológicas), requiriendo para ello de esfuerzos, instrumentos y aplicación de metodologías como las que aportan las ciencias económicas a través de la economía ambiental.

I. MARCO REFERENCIAL

1.1. Aspectos Generales de la Investigación

1.1.1. Objetivo General y Específicos

1.1.1.1. Objetivo General

Establecer un sistema de valoración económica del recurso geotérmico salvadoreño, por medio del método de valoración directa de cambio en la productividad, para determinar el valor del recurso natural como insumo en la generación de energía eléctrica, en el marco del proyecto de minado de bitcoin en El Salvador.

1.1.1.2. Objetivos Específicos

- Determinar desde la visión utilitarista el valor de uso del recurso ambiental prestado por las centrales de energía geotérmica en El Salvador.
- Estimar los niveles de productividad que generan los valores de uso del recurso ambiental geotérmico en El Salvador, como elemento de valoración económica del mismo.
- Mostrar la valoración económica del recurso ambiental geotérmico como insumo energético en el sector agrícola y en el sector de minado de bitcoin a través de sus niveles de productividad para sugerir la asignación más eficiente del recurso.
- Fundamentar la razón del por qué migrar hacia una matriz energética de fuentes renovables, limpias y sostenibles en el tiempo, ampliando y diversificando su base según sea el caso.

1.1.2. Hipótesis Generales y Específicas

1.1.2.1. Hipótesis General

La valoración económica del recurso ambiental geotérmico permite asignar el recurso ambiental de forma eficiente entre los diversos usos alternativos que se le pueda dar.

1.1.2.2. Hipótesis Específicas

- **Hipótesis Específica N°1**

El valor de uso del recurso ambiental prestado por las centrales de energía geotérmica en El Salvador, como insumo en la generación de electricidad, no ha sido determinado por ningún sistema de valoración económica.

- **Hipótesis Específica N°2**

Los niveles de productividad que generan los valores de uso del recurso ambiental geotérmico en El Salvador no han sido estimados por un sistema de valoración económica.

- **Hipótesis Específica N°3**

El valor de uso del recurso ambiental geotérmico que genera mayor productividad como insumo energético, y que permite asignar el recurso ambiental de forma más eficiente, no ha sido establecido por un sistema de valoración económica.

- **Hipótesis Específica N°4**

La migración de forma progresiva hacia un enfoque de fuentes de energías renovables, limpias y sostenibles en la matriz energética nacional es necesaria para reducir progresivamente la dependencia de energía de El Salvador de fuentes de energía fósil, así como el déficit energético general del país en su aprovisionamiento.

1.1.3. Metodología de Abordaje de la Investigación

1.1.3.1. Generalidades de la Metodología

1.1.3.1.1. Diseño de la Investigación

Enfoque de la investigación: Se utilizó un enfoque de investigación mixto, combinando elementos cualitativos y cuantitativos para obtener una valoración económica integral del recurso ambiental geotérmico como insumo principal en la producción de energía eléctrica en las plantas geotérmicas, así como su asignación eficiente según su productividad. La elección de un enfoque mixto se justifica por la necesidad de capturar tanto la profundidad y riqueza de la información cualitativa como la precisión y objetividad de los datos cuantitativos. Según Sampieri (2010), las investigaciones mixtas permiten una comprensión más completa de fenómenos complejos, como la valoración de recursos ambientales, que no pueden ser completamente entendidos solo a través de un enfoque cualitativo o cuantitativo.

Mitigación de Sesgos: Para asegurar la fiabilidad y validez de los datos se implementaron técnicas de triangulación, utilizando múltiples fuentes de datos (entrevistas, documentos, bases de datos). La triangulación ayuda a minimizar el sesgo de selección y proporciona una verificación cruzada de la información.

1.1.3.1.2. Población y Muestra

La población objetivo incluye regiones geográficas con potencial geotérmico (Ahuachapán y Usulután), donde se encuentran plantas generadoras de energía geotérmica, así como actores clave en la industria energética y ambiental. Esta elección se basa en la relevancia de estas regiones y actores para el estudio, asegurando que los datos recolectados sean representativos y pertinentes.

Mitigación de Sesgos: Para evitar sesgos en la selección de la muestra se utilizó un muestreo estratificado que considera diferentes grupos dentro de la población objetivo. Esto asegura una representación equitativa de todas las subpoblaciones (de ser necesario).

1.1.3.1.3. Recopilación de Datos

Datos cualitativos: Se realizó una investigación documental que incluyó libros, monografías, entrevistas y columnas con opiniones de expertos en geotermia, economía ambiental, políticas energéticas y minería de criptomonedas. Esta variedad de fuentes cualitativas permite una comprensión profunda y contextualizada del problema de investigación. Todo lo anterior por medio de los siguientes elementos:

- **Entrevistas:** Se revisaron entrevistas semiestructuradas con expertos clave en geotermia, economía ambiental y minería de criptomonedas. Las entrevistas fueron grabadas y transcritas para su posterior análisis.
- **Documentación:** Se revisaron documentos relevantes, incluyendo informes gubernamentales, estudios académicos y publicaciones especializadas.

Datos cuantitativos: Se recopilaron datos cuantitativos principalmente a través de fuentes secundarias, como bases de datos gubernamentales, informes de organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, estudios previos sobre geotermia y minería de bitcoin, y datos económicos relevantes. Esto proporciona una base sólida de datos objetivos y verificables. Todo lo anterior por medio de los siguientes medios:

- **Bases de datos:** Se accedió a bases de datos públicas y privadas para recopilar información sobre producción de energía, consumo de energía, costos, entre otros.

- **Análisis estadístico:** Los datos cuantitativos fueron analizados utilizando software estadístico como SPSS o R para realizar análisis descriptivos y regresiones.

Mitigación de Sesgos: Para asegurar la precisión y validez de los datos cuantitativos se realizó una verificación cruzada con múltiples fuentes, aplicando técnicas de validación estadística. Además, se utilizó software estadístico para el análisis de datos, minimizando el error humano y aumentando la precisión de los resultados.

1.1.3.1.4. Desarrollo del Sistema de Valoración Económica

Identificación de indicadores: Se identificaron indicadores clave para evaluar el valor económico del recurso geotérmico como insumo en la generación de electricidad o minado de bitcoin, considerando aspectos como costos de la energía eléctrica, producción de electricidad por energía geotérmica, consumo de energía por equipos mineros de bitcoin, relación de la producción de maíz con producción eléctrica de geotermia, consumo de electricidad por medios de pago electrónicos tradicionales, emisiones de carbono y beneficios económicos locales.

Diseño del sistema de valoración: Se desarrolló un sistema de valoración económica utilizando el Método de Cambio en la Productividad (MCP), integrando los indicadores identificados para estimar el valor económico del recurso en sí. Este método fue seleccionado por su capacidad para reflejar cambios en la productividad debido a la variación en el uso de los recursos geotérmicos, proporcionando una estimación precisa del valor económico.

Mitigación de Sesgos: Se utilizaron técnicas de validación cruzada y coeficiente de determinación (R cuadrado) en el modelo de regresión lineal para comparar los resultados cuantitativamente, complementado con un análisis cualitativo. Estas técnicas aseguran que los resultados sean fiables y reproducibles.

1.1.3.1.5. Análisis de Datos

Análisis cualitativo: Las opiniones de expertos extraídas de entrevistas, libros y columnas se estudiaron utilizando análisis de contenido para identificar patrones, temas y perspectivas sobre los aspectos económicos y ambientales del recurso geotérmico y del minado de bitcoin. Lo anterior se llevó a cabo por medio de:

- **Análisis de contenido:** Las transcripciones de las entrevistas y documentos de interés fueron interpretadas para identificar temas y patrones recurrentes.
- **Contraste entre fuentes consultadas:** Se comparó a las distintas fuentes entre sí para obtener información adicional que no podría extraerse de ellas por aparte.

Análisis cuantitativo: Se realizó un análisis económico comparativo cuantitativo, involucrando cálculos de costos, beneficios y productividad relacionados con la producción y uso de energía geotérmica en el minado de bitcoin, en relación a usos más convencionales como la producción agrícola del maíz. Se llevó a cabo por medio de:

- **Regresión lineal:** Se utilizaron modelos de regresión lineal para analizar la relación entre las variables identificadas.
- **Mínimos Cuadrados Ordinarios:** Se empleó la técnica de Mínimos Cuadrados Ordinarios para definir la relación entre las variables de interés.

Mitigación de Sesgos: En el análisis de datos se aplicaron técnicas estadísticas avanzadas, con múltiples pruebas de robustez para asegurar la consistencia de los resultados.

1.1.3.1.6. Validación y Confianza

Se aplicaron técnicas de validación cruzada, triangulación de datos y coeficiente de determinación (R cuadrado) en el modelo de regresión lineal para comparar los resultados

cuantitativamente, complementado con un análisis cualitativo, garantizando la validez y confiabilidad de los hallazgos, así como de las conclusiones obtenidas.

1.1.3.1.7. Justificación de las Variables Seleccionadas e Interpretación de Resultados

Dado que se eligió el MCP para la metodología de este estudio, se empleó el servicio en que el bien ambiental es un insumo directo, así como su posible uso alternativo, la electricidad y el minado de bitcoin. Se empleó como variable de comparación la producción de maíz en el sector agrícola en uso de la prerrogativa del equipo investigador de seleccionar el bien con el cual realizar este estudio, siendo el maíz seleccionado por ser un bien básico y de carácter simbólico para el país. Los resultados del sistema de valoración económica se interpretaron en función de los indicadores identificados, discutiéndolos en el contexto de la productividad, sostenibilidad ambiental y desarrollo económico, con el objetivo de aportar un mayor nivel de bienestar a la población salvadoreña.

1.1.3.1.8. Conclusiones y Recomendaciones

Se presentarán las conclusiones en base a los resultados obtenidos y se propondrán recomendaciones para la implementación de políticas, regulaciones y estrategias relacionadas con el uso óptimo y sostenible del recurso geotérmico en El Salvador, considerando su máxima productividad estimada a través del sistema de valoración establecido en el presente estudio.

1.1.3.1.9. Limitaciones

Las limitaciones del estudio incluyeron aspectos temporales, dado que la instauración del bitcoin como moneda de curso legal y el posible uso de recursos geotérmicos para su minería son recientes (año 2021, lo que limita la disponibilidad de estudios previos), así como limitaciones metodológicas; a su vez, posibles sesgos en la selección de variables y datos de

interés debido a factores subjetivos inherentes a las ciencias sociales como la economía. Factores exógenos no considerados como la evolución de la coyuntura política, económica y social nacional, que pueden influir en la pertinencia o vigencia de los hallazgos del estudio.

1.2. Marco Teórico-Conceptual

1.2.1. Energía Geotérmica

1.2.1.1. Concepto de Energía Geotérmica

La energía geotérmica es la que se extrae del calor situado en el interior de la tierra. Esta se considera renovable y limpia por el carácter prácticamente inagotable del recurso y las bajas emisiones por su uso. La principal emisión de las plantas geotérmicas es vapor de agua, las demás son nulas o considerablemente pequeñas en comparación con las de tipo convencional. Se ha comprobado que la explotación de campos geotérmicos no afecta las reservas energéticas de los mismos (Santoyo & Barragán, 2010). La existencia de campos geotérmicos obedece a la naturaleza dinámica de la corteza terrestre, la cual está conformada por placas tectónicas. La Ilustración 1 expone los límites de las principales placas tectónicas del planeta, así como la ubicación de las denominadas “provincias geotérmicas”.

Ilustración 1. Límites de placas tectónicas y distribución de provincias geotérmicas



Fuente: Bona P., & Coviello, M., D. Valoración y Gobernanza de los Proyectos Geotérmicos en América del Sur. (2016), pp. 14

La energía geotérmica se puede clasificar según la temperatura del fluido que se extrae de ella. Los recursos de baja entalpía tienen una temperatura inferior a 90°C, los de media entalpía tienen una temperatura entre 90°C y 150°C, y los de alta entalpía tienen una temperatura superior a 150°C. Los recursos de media y alta entalpía son los más adecuados para la producción de energía eléctrica ya que contienen una cantidad mayor de calor útil (Hiriart et al, 2011). Teniendo eso en cuenta, Santoyo y Barragán (2010) describen los sistemas geotérmicos más conocidos, que se detallarán más adelante.

1.2.1.2. Sistemas Geotérmicos

a) Sistemas hidrotermales convectivos

Los sistemas hidrotermales son los sistemas geotérmicos más comunes. Se forman cuando el calor del interior de la Tierra calienta el agua subterránea. Los yacimientos se manifiestan en la superficie terrestre en forma de “manantiales calientes, fumarolas, géiseres, lagunas de lodo hirviendo o suelos calientes” (Santoyo y Barragán, 2010, pág. 42). Los fluidos de los sistemas hidrotermales son los más utilizados en la producción de electricidad. El vapor de agua se utiliza para mover una turbina que genera electricidad.

El material a utilizar para la generación de geotermoelectricidad se obtiene mediante la perforación de pozos en zonas con posible potencial energético. El tipo de planta a instalar puede ser de ciclo binario o de flasheo de vapor (Lagos, S. 2017), lo cual dependerá de la clase de recurso a obtener y la temperatura que tenga.

- **Ciclo binario:** El fluido geotérmico se calienta hasta su punto de ebullición y se utiliza para generar vapor. El vapor se utiliza para mover una turbina que genera electricidad.
- **Flasheo de vapor:** El fluido geotérmico se inyecta en una cámara donde se somete a presión. El fluido se calienta y se vaporiza, y el vapor se utiliza para mover una turbina que genera electricidad.

b) Sistemas geotérmicos mejorados

Los sistemas geotérmicos de roca seca caliente son yacimientos de roca muy caliente que no contienen fluidos (650 °C). Para extraer el calor, se fractura la roca e inyectan fluidos que transportan el calor a la superficie.

- **Fracturación:** Se utilizan explosivos u ondas sonoras para fracturar la roca.
- **Inyección de fluidos:** Se inyectan fluidos en las fracturas de la roca. Los fluidos se calientan y se transportan a la superficie.

c) Sistemas geotérmicos geopresurizados

Los sistemas geotérmicos de agua caliente con metano utilizan recursos de media entalpía. Estos sistemas están formados por agua y metano disuelto a una presión muy alta. Son aún más desconocidos que los sistemas de roca seca caliente.

d) Sistemas geotérmicos marinos

Se conoce que están situados en el fondo del mar y se localizan gracias a chimeneas hidrotermales y fumarolas. Según los sistemas encontrados en México, se presumen útiles para recursos de alta entalpía.

e) Sistemas geotérmicos magmáticos

Los sistemas geotérmicos de magma son yacimientos de rocas fundidas a temperaturas muy altas (800 °C). Estas rocas se encuentran cerca de volcanes activos. La falta de tecnología que resista la corrosión provocada por estas temperaturas imposibilita la explotación de estos sistemas.

f) Sistemas geotérmicos supercríticos

Los sistemas geotérmicos supercríticos contienen fluidos en un estado que no es ni líquido ni gaseoso. Este estado se debe a la alta presión y temperatura de los fluidos que se encuentran a profundidades muy grandes.

Se presume que estos sistemas tienen la capacidad de “proveer hasta diez veces más energía que los sistemas geotérmicos convencionales, por lo que de ser factible su explotación, la capacidad geotermoeléctrica podría incrementarse en varios órdenes de magnitud” (Santoyo & Barragán, 2010, pág. 46). En la actualidad, aún se encuentran en proceso de investigación.

El Salvador cuenta con sistemas hidrotermales convectivos los que, como ya se había mencionado anteriormente, son los sistemas más comunes. Según la empresa estatal salvadoreña encargada de los procesos de extracción de energía geotérmica (LaGeo), estos tipos de fuentes de energía se encuentran a lo largo y ancho de la cadena volcánica que atraviesa el país, desde Ahuachapán hasta el volcán de San Miguel y Conchagua, formando lo que comúnmente se conoce como los campos geotérmicos, entre los cuales se puede mencionar: los Ausoles de Ahuachapán, el Tronador en Berlín, los Infiernillos en San Vicente.

1.2.1.3. Ventajas y Desventajas en el Uso de la Energía Geotérmica¹

La energía geotérmica tiene ventajas y desventajas, que se pueden clasificar en económicas y ambientales. Algunas de estas ventajas y desventajas de la energía geotérmica son las siguientes (Lagos, S. 2017):

- **Renovabilidad:** La energía geotérmica se produce a partir del calor del interior de la Tierra, que es un recurso inagotable. Esto significa que la energía geotérmica no se agotará nunca, lo que la hace una inversión segura a largo plazo².
- **Disponibilidad:** El calor del interior de la Tierra se encuentra en todo el mundo, independientemente de las condiciones climáticas. Esto significa que la energía geotérmica es una opción viable para los países con climas fríos o cálidos.

¹ Parte de la información presentada en esta sección constituye hechos de conocimiento general de la industria geotérmica.

² Blanchard (2012) establece una distinción entre la inversión en el sentido tradicional de la palabra (compra de oro y activos), y la compra de bienes de capital. Para este caso en concreto entiéndase en el sentido tradicional.

- Eficiencia: Las centrales geotérmicas pueden operar durante la mayor parte del año, lo que las hace una fuente de energía eficiente.
- Independencia: La energía geotérmica no está sujeta a los precios de los combustibles fósiles, que son volátiles y pueden aumentar rápidamente. Esto puede ayudar a los países a reducir su dependencia energética de los combustibles fósiles.
- Costo: El costo de producción de la energía geotérmica es relativamente bajo (una vez en operación), siendo una opción atractiva para los consumidores (véase anexo 1).
- Tecnología: La tecnología geotérmica es bien conocida y ha sido ampliamente desarrollada. Esto significa que las centrales geotérmicas son relativamente fáciles de construir y operar, reflejándose en su aumento de capacidad global (véase anexo 2).
- Ampliabilidad: Las centrales geotérmicas se pueden ampliar fácilmente para satisfacer la demanda creciente. Esto las hace una opción atractiva para los países que están creciendo rápidamente.

Ventajas ambientales de la energía geotérmica:

- Baja emisión de gases de efecto invernadero: La energía geotérmica no produce emisiones de dióxido de carbono (CO₂), que es el principal gas de efecto invernadero. Esto la convierte en una opción atractiva para la lucha contra el cambio climático.
- Bajo impacto ambiental: Las centrales geotérmicas no requieren grandes cantidades de agua o espacio. Tampoco producen emisiones contaminantes, como los óxidos de nitrógeno, el dióxido de azufre o los metales pesados, lo que le hace estar en línea con un desarrollo económico sostenible³.

³ Cáceres (2008), establece una distinción entre desarrollo económico y desarrollo sostenible, siendo este último el caso que aplica para todo proyecto económico con bajo o nulo impacto ambiental. Ramirez (2017), hace hincapié en la evaluación de impactos para garantizar la sostenibilidad de todo desarrollo económico.

- Menor impacto visual: Las centrales geotérmicas son relativamente pequeñas y discretas. Esto las convierte en una opción atractiva para las zonas urbanas o turísticas.

Desventajas económicas de la energía geotérmica:

- Limitación de recursos: La energía geotérmica se produce a partir del calor del interior de la Tierra. Este calor se encuentra en forma de fluidos calientes que se encuentran en yacimientos geotérmicos. Los yacimientos geotérmicos no se encuentran en todos los lugares del mundo, por lo que la disponibilidad de esta fuente de energía es limitada (véase anexo 3).
- Costos de inversión: El desarrollo de un proyecto geotérmico requiere una inversión inicial elevada. Esto se debe a los costos de exploración, perforación y construcción de las instalaciones. Las actividades de exploración pueden ser costosas, ya que requieren el uso de equipos especializados. La perforación de pozos geotérmicos también es costosa, ya que requiere el uso de equipos pesados y especializados. La construcción de las instalaciones geotérmicas también es costosa, ya que requiere el uso de materiales y mano de obra especializada (véase anexo 1).
- Dificultad de acceso: Los yacimientos geotérmicos a menudo se encuentran en zonas de difícil acceso. Esto puede aumentar los costos de construcción e instalación, ya que es necesario utilizar equipos y mano de obra especializados para acceder a estas zonas (véase anexo 3).
- Mantenimiento: Las instalaciones geotérmicas requieren un mantenimiento periódico para garantizar su funcionamiento. Este mantenimiento puede incluir la limpieza y reparación de los equipos, así como el reemplazo de piezas desgastadas. El mantenimiento periódico puede suponer un costo adicional para los operadores.

- Ampliación de la oferta: Para ampliar la oferta de energía geotérmica es necesario realizar más perforaciones. Esto requiere una inversión adicional, ya que es necesario perforar nuevos pozos para acceder a nuevos yacimientos geotérmicos.

Desventajas ambientales de la energía geotérmica:

- Contaminación: Los fluidos geotérmicos pueden contener contaminantes, como el sulfuro de hidrógeno (H₂S) y el dióxido de carbono (CO₂). Estos contaminantes pueden ser liberados a la atmósfera o al agua, lo que puede tener un impacto negativo en el medio ambiente.
- Contaminación térmica: La energía geotérmica puede causar contaminación térmica, que es el aumento de la temperatura del agua o el aire en un área determinada. Esto puede dañar los ecosistemas acuáticos y terrestres.

1.2.2. Economía Ambiental: *Un Enfoque Neoclásico*

La economía ambiental utiliza los principios y herramientas de la economía neoclásica para analizar cómo las actividades económicas afectan al medio ambiente, y para desarrollar políticas públicas que orienten los recursos de manera eficiente. Lo anterior se encuentra en línea con el ideal de las economías capitalistas de mercado de conseguir el pleno empleo de los recursos, así como su uso más eficiente⁴ (V. Feijoó, J. 1997). Así mismo, es importante tener en cuenta que la economía ambiental se ha visto influenciada por otras escuelas de pensamiento económico, sobre todo en este tema en particular (al promover la idea de que el medio ambiente debe ser considerado un bien económico). Esto ha llevado a la economía ambiental a desarrollar nuevas herramientas y metodologías para evaluar el valor económico del medio ambiente.

⁴ Existen dos tipos de eficiencias, la estática y la dinámica. La primera no toma en cuenta el factor tiempo, ya que el transcurso de este puede alterar la eficiencia de los recursos. Para efectos de simplificación de este trabajo, se considerará a la eficiencia en su acepción estática.

Los fundamentos de estudio presente se reflejan en diversidad de fuentes bibliográficas, y de autores, que se han encargado de hacer crecer el estado del arte en materia de: *valoración económica ambiental, valores de uso, productividad, economía ambiental, uso eficiente de los recursos ambientales, análisis de impactos ambientales, fuentes energéticas, métodos de valoración económico, análisis energético de las criptomonedas, etc.*

De manera más concisa, Kolstad (2000) define ¿Qué es la economía ambiental? Como: *“La economía ambiental estudia los impactos de la economía sobre el medio ambiente, la importancia del medio ambiente para la economía y la manera apropiada de regular la actividad económica con miras a alcanzar un equilibrio entre las metas de conservación ambiental, de crecimiento económico y otras metas sociales como, por ejemplo, el desarrollo económico y la equidad intergeneracional”.*

La economía ambiental provee las herramientas analíticas y cuantitativas para estudiar y tratar de dar soluciones a los problemas de asignación ineficiente de recursos naturales y ambientales en la sociedad (Mendieta, J. C. 2000). Por tal motivo, el presente estudio busca hacer su aporte al enfoque de la economía ambiental por medio de la valoración económica del recurso geotérmico, en cuanto a la asignación eficiente del mismo, acompañando así el crecimiento económico sostenible, el cual no compromete los recursos ambientales.

1.2.3. Fundamentos del Valor de los Recursos Ambientales

Los recursos ambientales al ser utilizados por los individuos tanto en actividades de consumo⁵ como producción generan bienestar para la sociedad. Debido a esto, los individuos pueden considerar el hecho de asignar un valor económico para estos y por consiguiente poder tratarlos como un *bien económico*, tal como lo sugiere la economía ambiental.

⁵ Entiéndase tanto consumo final como consumo intermedio, siendo este último definido por el glosario del BCR como los bienes y servicios consumidos en la producción. (BCR, 2018).

“El afán que nos mueve es evidenciar las razones por las cuales el medio ambiente posee un valor económico, que en muchas ocasiones es imposible de evidenciar y por definición incalculable, pero nunca inexistente”

(Aguilera, D. 2006)

De Groot, basándose en Eagles, realizó una clasificación de las funciones que cumplen los recursos ambientales y los fundamentos de su valor económico (tomado de Jiménez, 1996):

- **Funciones de soporte o carga:** Funciones de construcción, transporte, eliminación de residuos, funciones recreativas antropocéntricas.
- **Funciones de producción conjunta:** Funciones de producción agrícola, funciones de producción de energía, funciones intensivas y extensivas de producción animal, etc.
- **Funciones de significación:** Funciones de significación científica, funciones de contemplación, funciones de participación, etc.
- **Funciones de hábitat:** Funciones para el desarrollo de especies, reserva de hábitat.

A partir del conocimiento de las funciones que genera el medio ambiente y sus recursos, y de su complementariedad con la actividad humana, es posible aventurarse al cálculo del **valor económico total** (Jiménez, 1996). Algunos valores económicos son evidentes porque tienen reflejo directo o indirecto en el mercado. El caso del recurso geotérmico es evidente puesto que su servicio ambiental tiene un reflejo directo en la **función de producción conjunta**, como función de producción de la energía geotérmica.

1.2.4. Método de Valoración Económica: Cambio en la Productividad

La presente investigación busca establecer un sistema de valoración económica del recurso ambiental geotérmico por medio de la aplicación de la metodología de valoración

directa de *Cambios en la Productividad (MCP)*. El sistema de valoración económico ambiental es un conjunto de métodos y técnicas que permiten estimar el valor monetario de los beneficios y los costos que generan los bienes y servicios ambientales. El objetivo es incorporar el valor ambiental en la toma de decisiones sobre proyectos o políticas que afecten el medio ambiente (Ripka, Adriana et al., 2018).

La metodología de *Cambios en la Productividad* es considerada como una extensión directa del análisis tradicional de costo - beneficio. Tal como menciona Izko y Burneo (2003), cuando un proyecto de desarrollo afecta la producción y/o productividad (positiva o negativamente), los cambios generados pueden ser valorados utilizando precios de mercado⁶.

Para efectos del presente estudio se entenderá productividad como:

“... la relación que existe entre los insumos y los productos de un sistema productivo. A menudo es conveniente medir esta relación como el cociente de la producción entre los insumos. Mayor producción, mismos insumos, la productividad mejora”

(Schroeder, Roger G. McGraw Hill, Pág. 533, Administración de Operaciones, 2006).

La selección de esta metodología (MCP) sirve al objetivo central de este trabajo académico, el cual es enlazar la teoría económica (desde el enfoque de la economía ambiental), con la resolución de un problema práctico (la falta de valoración económica de un recurso ambiental), cuyo *servicio ambiental* aunque carezca de precio de mercado, es posible realizar una *estimación indirecta* de este, abonando con ello al propósito de hacer una gestión y asignación eficiente del recurso en sí, ya que una *valoración económica nula* de este implicaría en la práctica un precio nulo, lo que en términos económicos equivaldría a un consumo ilimitado, siendo esto físicamente insostenible, y en efecto, contrario a la eficiencia económica.

⁶ En su acepción más simple (BCR, 2018) “la cantidad de dinero dada a cambio de una mercancía o servicio”.

Para la definición del método a utilizar, llamado *Cambios en la Productividad*, se siguió una serie de puntos con los cuales fue posible el desarrollo del análisis. Cabe mencionar aquí que dicho método fue elegido dado que es popular entre quienes abordan problemáticas en materia ambiental, ya que demuestra cierta flexibilidad al abordar la dificultad que encierra la cuestión de estimar precios para recursos que los mecanismos ordinarios del mercado no pueden determinarlos, llevando esto a cabo de manera indirecta en base a:

- La identificación de los usos y servicios que proporciona el recurso geotérmico.
- Identificación de las variables de cambio en la productividad (debido a que el MCP logra estimar indirectamente el precio del recurso por medio de los cambios en productividad de los bienes y servicios que dependen de este).
- Establecimiento de los valores iniciales de las variables seleccionadas.
- Evaluación de los cambios de productividad, y empleo de técnicas de valoración económica para la determinación de las fluctuaciones de la misma (por medio del MCP).

Con base a lo anterior, y teniendo presente que la valoración ambiental está basada en enfoques antropocéntricos y utilitarios (pues trata de recoger todos los valores que contribuyen a la satisfacción o bienestar de la humanidad) (Llamas, 2008), es así como se ha seleccionado la metodología con la que opera la presente investigación. Finalmente, y tomando en cuenta la distinción que hace Carrasco en los niveles de investigación que propone (Carrasco, 2016), vale acotar que además de ser una investigación aplicada, este trabajo es a su vez de tipo descriptivo (pues busca detallar las interrelaciones entre las variables investigadas sin profundizar en sus nexos causales), en tanto persigue producir el conocimiento del cual se pueda establecer una solución a la problemática central de la investigación, la cual es la elaboración de un sistema que permita hacer un estimación del valor del recurso ambiental geotérmico.

1.2.5. Instrumento y Técnica a Utilizar para la Valoración.

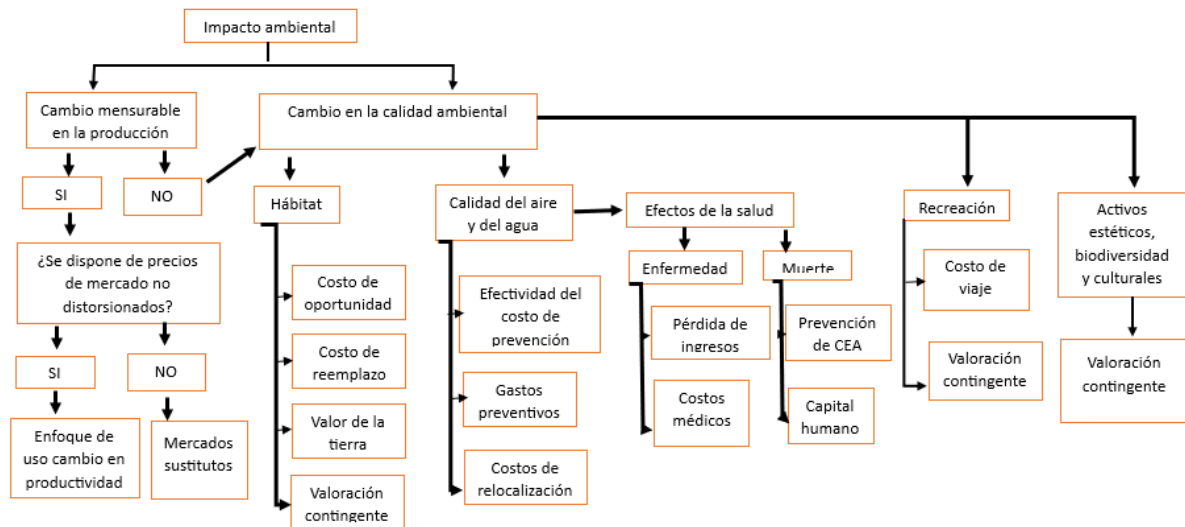
Un número significativo de técnicas de valoración económico ambiental existen para aplicar a cada una de las categorías de valor. La selección de la técnica apropiada depende de varios factores, incluyendo el recurso a valorar y la disponibilidad de datos, tiempo y recursos financieros (Dixon, 1998). A partir de lo anterior se constituyen los fundamentos que deben guiar toda investigación.

En el Esquema 1 (véase la página 20), se muestra la guía en la que se basa el presente estudio para elegir la técnica a utilizar en la investigación. Dicha figura provee de forma simplificada las pistas para optar por la técnica más apropiada para diferentes situaciones de valoración ambiental.

El gráfico de flujos da inicio con un impacto ambiental, mediante el cual se evalúa dos escenarios; por una parte, un cambio mensurable en la producción; y por otra, un cambio en la calidad ambiental. Se muestran las técnicas más comúnmente usadas para estimar los valores monetarios de cada clase de impacto (Tomasini, 2000). Más adelante se detalla las vías por las cuales esta teoría es puesta en práctica.

Por ahora, cabe recalcar que para el caso particular del presente estudio se utilizará el Método de Cambio en la Productividad (MCP), que dentro del mapa de flujo visto a continuación (véase la siguiente página), se encuentra en la categoría de cambio mensurable en la producción que, luego de dicha afirmación, se cuestiona si existen precios de mercado no distorsionados, donde es importante dejar claro que se hace referencia a precios de mercado del producto en el cual el recurso ambiental sirve como insumo para su producción (Cristeche, E. & Penna, J. 2008).

Esquema 1. Diagrama de flujo sobre técnicas de valoración económica



Fuente: Elaboración con base a Tomasini, D. *Valoración Económica del Ambiente*. (2000), pp. 12

Uno de los fundamentos por los que se ha decidido la aplicación de esta metodología y técnica en particular es por la medición. Por lo que, partiendo de este elemento, es oportuno detallar las técnicas e instrumentos con los que el presente método se concreta en la práctica para esta investigación:

- **Recopilación de datos de fuentes primarias y secundarias:** Por medio de este método se obtendrá información numérica que servirá para la descripción y posterior análisis de la solución elaborada para la problemática en estudio.
- **Análisis de datos de fuentes primarias y secundarias:** Una vez recopilados los datos de las fuentes previamente mencionadas, se procederá al detallado de las cuestiones más relevantes del fenómeno en estudio
- **Análisis estadístico descriptivo:** Finalmente, por medio de la técnica en cuestión, se elaborarán modelos de regresión, gráficos, infografía, y demás elementos visuales que servirán a una mejor comprensión de las variables en estudio.

1.2.6. Conceptualización: Inseguridad Energética y Dependencia Energética

En primer lugar ¿Qué es lo que se entiende por inseguridad energética? Concepto por el cual es posible abordar con mayor precisión cuál es la situación energética en El Salvador, y dar una respuesta al dilema de si existe un estado de crisis y la estimación de la misma.

Cuando se aborda el problema de la gestión eficiente de los recursos ambientales, particularmente en este caso de estudio relacionado a la energía geotérmica, se debe situarse en un tiempo y espacio determinado. Las dos categorías de tiempo y espacio están definidas de la siguiente manera: En este caso la categoría espacial es El Salvador, y las categorías temporales sobre las cuáles se presentará el análisis de este caso de estudio se subdividen en dos: **estructura y coyuntura**. Dichas categorías de temporalidad se toman de la clasificación que realiza el historiador francés Fernand Braudel. En la distinción que realiza, el tiempo como categoría admite la posibilidad de *fragmentación del tiempo* en un corto (acontecimiento), mediano (coyuntura) y largo plazo (estructura), (de Paula, G., & Lorenzo C. 2009).

El estudio de las diferentes categorías, conceptos y fundamentos claves del presente estudio se realizan bajo dichas categorías de temporalidad, optándose por ellas debido al carácter histórico y estructural que se ha tenido del problema de la inseguridad energética en El Salvador, pero a su vez de la suma importancia coyuntural que tiene en este momento en el marco de las políticas públicas energéticas y el uso que se está pretendiendo de las fuentes de energía para el proyecto de minado de criptomonedas en El Salvador.

El carácter estructural del problema de la inseguridad energética es un aspecto fundamental a estudiar y por lo tanto debe quedar en claro ¿a qué se refiere cuando se habla sobre inseguridad energética? Tomando en cuenta lo anterior, es posible afirmar que inseguridad energética es la inestabilidad en el suministro u obtención de energía y las

dificultades económicas para conseguirla⁷. Dicha inestabilidad puede ser causada por factores internos como externos (puesto que el factor geopolítico también juega un rol fundamental en el comercio internacional, y con ello, en las vías de obtención de los suministros energéticos); así mismo, los factores internos tales como los económicos son clave en temas de precios (oferta – demanda) que puede hacer más complicado su adquisición (Rodríguez, 2018).

En relación a lo anterior, surge el concepto de la dependencia energética en cuanto que la inseguridad energética antecede a la dependencia energética. La inseguridad energética según WEF está clasificada en tres niveles (media – alta – muy alta), pero después de ellos se llega a una situación de crisis donde se habla de dependencia energética.

La dependencia energética es la incapacidad de un país para generar con recursos propios la mayoría de los combustibles y energía que requiere para sus diversas actividades productivas, por lo que ineludiblemente debe recurrir al mercado externo. Una alta dependencia energética provoca un déficit en la balanza comercial en tal país, siendo además un factor de inestabilidad económica por las posibles variaciones en los precios de los insumos energéticos, provocando especulación de precios de los mismos en mercados internacionales, suponiendo posibles choques externos que pueden impactar negativamente a tales economías a la postre.

Una elevada dependencia energética provoca inestabilidad en el abastecimiento y afectaciones en la economía en general. El suministro eléctrico puede ser irregular ya que no se encuentra bajo el control del país importador; mientras que la economía puede verse afectada por las fluctuaciones del precio de la energía. Como consecuencia, la dependencia energética puede desencadenar problemas productivos por la incertidumbre en el abasto, mientras que el incremento en los costos energéticos puede repercutir en el déficit de la balanza comercial de los países importadores (Sánchez, 2021).

⁷ No confundir con dependencia energética, concepto que se verá más adelante.

1.2.7. Conceptualización: Migración a Fuentes de Energía Renovables

Migrar hacia una matriz energética basada en fuentes renovables, como la geotérmica, es de gran importancia por una serie de razones que abarcan aspectos ambientales, económicos y sociales. La energía geotérmica en particular, ofrece una serie de ventajas significativas que la convierten en una opción viable y sostenible para el futuro energético de muchos países.

En primer lugar, la transición hacia fuentes renovables como la energía geotérmica contribuye significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. A diferencia de los combustibles fósiles, la energía geotérmica produce una cantidad mínima de emisiones durante su operación. Esto es crucial para combatir el cambio climático y cumplir con los objetivos establecidos en acuerdos internacionales como el Acuerdo de París. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés), la adopción de energías renovables es esencial para limitar el aumento de la temperatura global y evitar las consecuencias más severas del cambio climático (IEA, 2020).

En segundo lugar, la energía geotérmica ofrece una fuente de energía estable y fiable. A diferencia de otras fuentes renovables como la solar o la eólica, que son intermitentes y dependen de las condiciones meteorológicas, la energía geotérmica proporciona un suministro constante de energía. Esto es particularmente beneficioso para la estabilidad de la red eléctrica y para garantizar un suministro continuo de electricidad. Además, la energía geotérmica tiene el potencial de ser una fuente de energía base, lo que significa que puede operar a un nivel constante de producción y contribuir significativamente a la estabilidad energética de un país.

Económicamente, la inversión en energía geotérmica puede generar beneficios a largo plazo. Aunque los costos iniciales de exploración y desarrollo de recursos geotérmicos pueden ser altos, los costos operativos y de mantenimiento son relativamente bajos en comparación con las plantas de energía basadas en combustibles fósiles. Además, el desarrollo de proyectos

geotérmicos puede crear empleos locales y promover el desarrollo económico en las áreas donde se encuentran los recursos geotérmicos.

Finalmente, la transición a una matriz energética renovable también mejora la seguridad energética de un país al reducir su dependencia de las importaciones de combustibles fósiles. Esto no solo disminuye la vulnerabilidad a las fluctuaciones de precios en el mercado internacional, sino que también aumenta la resiliencia energética frente a posibles interrupciones en el suministro.

En resumen, la migración hacia una matriz energética basada en fuentes renovables como la geotérmica es crucial para abordar los desafíos ambientales, económicos y de seguridad energética. Dado su potencial de reemplazar otras fuentes de energía como la fósil (Lund, J. W. et al. 2010), la adopción de estas tecnologías sostenibles no solo contribuye a la protección del medio ambiente, sino que también promueve un desarrollo económico equilibrado y una mayor seguridad energética.

1.2.8. Conceptualización: El sector agrícola y su relación con la energía

La relación entre el sector agrícola y el sector energético es compleja y multifacética, ya que ambos sectores son interdependientes. El sector agrícola depende en gran medida del sector energético para la producción, procesamiento, almacenamiento y distribución de alimentos. La energía es esencial para operar maquinaria agrícola, sistemas de riego, instalaciones de almacenamiento en frío y transporte de productos agrícolas. A su vez, el sector energético puede beneficiarse del sector agrícola a través de la producción de bioenergía y biocombustibles.

En primer lugar, el uso de maquinaria agrícola y sistemas de riego intensivos depende de una disponibilidad continua de energía. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la agricultura moderna está interrelacionada con la

energía para mejorar la productividad y eficiencia (FAO, 2011). Por ejemplo, el uso de tractores, cosechadoras y otros equipos mecanizados ha transformado la agricultura, permitiendo a los agricultores cultivar grandes extensiones de tierra con menor esfuerzo manual. Además, los sistemas de riego, que son cruciales en áreas con precipitaciones irregulares, requieren energía para bombear y distribuir el agua.

Por otro lado, el sector agrícola también puede contribuir significativamente al sector energético a través de la producción de bioenergía. Los cultivos energéticos, como el maíz y la caña de azúcar, se utilizan para producir biocombustibles como el etanol y el biodiésel. Estos biocombustibles pueden reducir la dependencia de los combustibles fósiles y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Según un informe del Banco Mundial, los biocombustibles representan una oportunidad para diversificar las fuentes de energía y promover el desarrollo rural (Banco Mundial, 2010).

Sin embargo, es importante equilibrar la producción de biocombustibles con la producción de alimentos para evitar la competencia por los recursos agrícolas. El desafío radica en desarrollar tecnologías y prácticas agrícolas sostenibles que optimicen el uso de la energía sin comprometer la seguridad alimentaria. La implementación de prácticas agrícolas sostenibles y el uso eficiente de la energía son cruciales para lograr un desarrollo equilibrado y sostenible en ambos sectores.

1.2.9. El Maíz y su Importancia Cultural en El Salvador⁸.

El maíz tiene una importancia central en la cultura salvadoreña, tanto desde una perspectiva histórica-antropológica como contemporánea. Dicho cultivo es más que un alimento básico; es un símbolo de identidad y tradición que ha moldeado la vida social, económica y religiosa del país.

⁸ Basado en hechos de conocimiento general en El Salvador, Foster, L. V. (2007) y Tilley, V. Q. (2005).

Históricamente, el maíz ha sido un elemento esencial en la dieta y la agricultura de El Salvador desde tiempos precolombinos. Las civilizaciones indígenas, como los mayas, consideraban al maíz como un regalo divino y lo incorporaron profundamente en sus mitologías y rituales. La leyenda del Popol Vuh, un texto sagrado de los mayas, describe la creación del hombre a partir de maíz, subrayando su relevancia cultural y espiritual⁹.

En la actualidad, el maíz sigue siendo un componente vital de la gastronomía salvadoreña. Platos tradicionales como las pupusas, tamales y atoles tienen al maíz como ingrediente principal¹⁰. Las pupusas, en particular, son un alimento emblemático que representa la identidad nacional. Este alimento no solo es un plato común en la dieta diaria, sino que también es un elemento unificador en eventos familiares y comunitarios.

Además, el maíz juega un papel crucial en la economía rural de El Salvador. Muchas familias campesinas dependen de su cultivo para su subsistencia. El maíz no solo se utiliza para el consumo propio, sino que también se vende en mercados locales, contribuyendo a la economía familiar y regional. La importancia del maíz también se refleja en las festividades y celebraciones. Durante la Fiesta de San Juan¹¹, que se celebra en junio, es común la realización de eventos y ceremonias que honran al maíz, resaltando su valor cultural y su conexión con la tierra y la agricultura.

En resumen, el maíz es más que un simple cultivo en El Salvador; es un pilar de la cultura, la economía y la identidad nacional. Su influencia se extiende desde las prácticas agrícolas hasta la cocina, pasando por las festividades y la mitología, consolidándolo como un elemento central en la vida salvadoreña; por lo cual y en base a lo anterior, es que para este estudio se decidió usar su producción nacional como punto de contraste en el MCP.

⁹ Léase el Popol Vuh, para más detalles.

¹⁰ Este hecho es de conocimiento general en El Salvador.

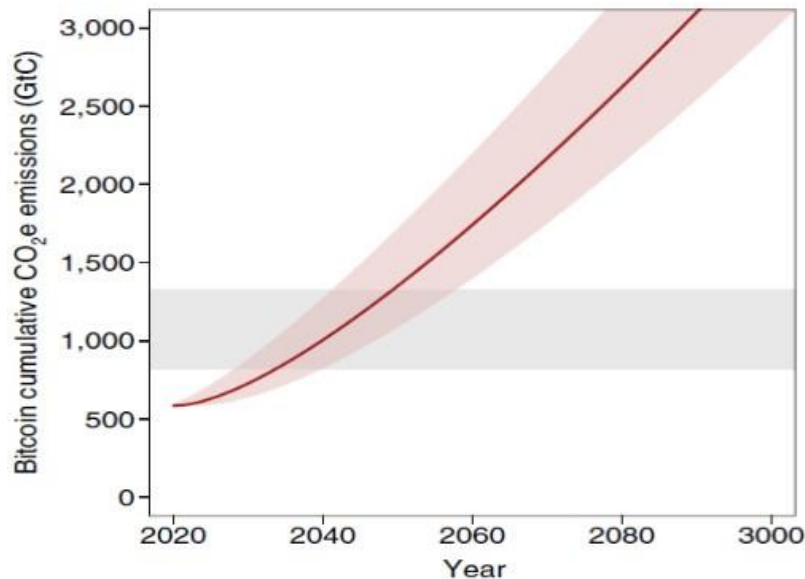
¹¹ Distrito de Nahuizalco, Municipio de Sonsonate Norte. Fiesta popular católica en honor de San Juan Bautista.

1.2.10. Bitcoin y la Demanda Energética

El uso de la moneda bitcoin es un tema que presenta una marcada polarización en la palestra pública, con posiciones encontradas de quienes ven sus ventajas en oposición a quienes, por el contrario, las señalan y desaprueban. Uno de los principales señalamientos a dicha criptomoneda ha sido el tema de su impacto medioambiental y la cantidad de energía que requiere para funcionar, ya que se necesitan importantes inyecciones de energía tanto para su producción (minado) como para su intercambio y control (Giudici et al., 2020).

En la Gráfica 1. Proyección de emisiones de CO₂ de bitcoin, se observa que -ceteris paribus¹²- la huella de carbono por parte del bitcoin aumentará, en caso que medios más eficientes para dar soporte a esta no sean desarrollados por parte de quienes sostienen el uso dicha criptomoneda.

Gráfico 1. Proyección de emisiones de CO₂ bitcoin (Año 2020-2080)



Fuente: Othman, A. Dr. & Bob, A. Dr. “*Bitcoin Mining’s Energy Consumption and Global Carbon Dioxide Emissions: Wavelet Coherence Analysis*”. Arab Monetary Fund. (2022), pp8.¹³

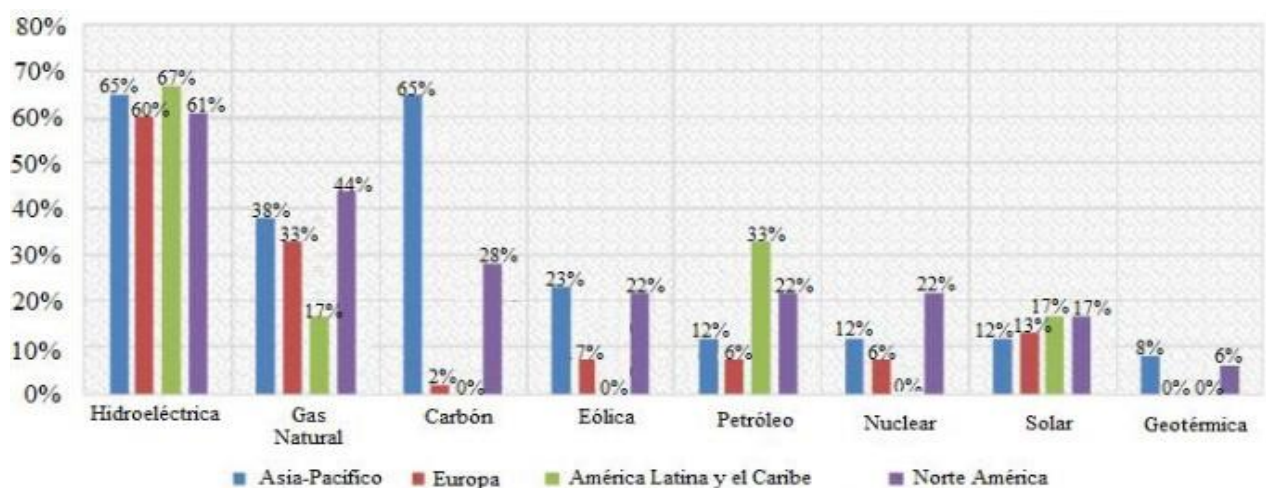
¹² Expresión latina que significa “siendo el resto de las cosas iguales”.

¹³ Error en la gráfica, en el eje de las abscisas. Debería decir: “2100” y no “3000” (sic).

¿A qué obedece el alto consumo energético necesario para el funcionamiento del bitcoin? Dado que el alto consumo de energía realizado por los sistemas informáticos de criptomonedas no es una característica obligatoria de los mismos, sino más bien una consecuencia del mecanismo más tradicional de su producción y administración, que en el caso de cripto-activos como el bitcoin corresponde a un esquema de competencia por algoritmos en un entorno de complejos acertijos criptográficos. Tal esquema (propio de ecosistemas desregulados y descentralizados), abona a la naturaleza volátil del valor del bitcoin, el cual históricamente experimenta fuertes fluctuaciones según sea el comportamiento de la oferta y la demanda en determinado tiempo.

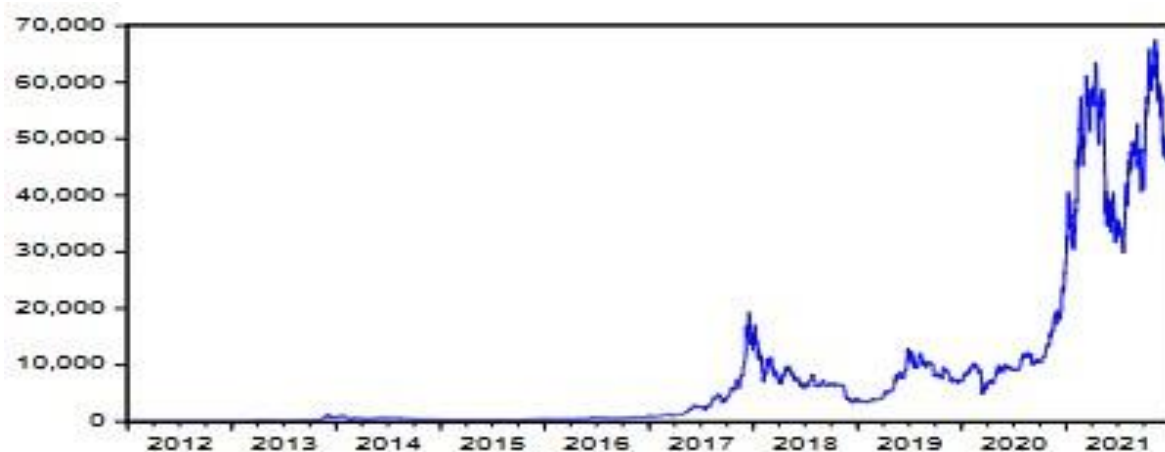
En la Gráfica 2 (Inyección de energía), se observa las principales fuentes de suministro de energía por región del planeta que da soporte a las operaciones de la criptomoneda. En la Gráfica 3. Fluctuaciones del valor de bitcoin (véase la siguiente página), se aprecia cómo en menos de media década (2017-2022), el valor de bitcoin (el precio) osciló en un rango entre \$USD 10.000 - \$USD 70.000, dato que evoca la alta susceptibilidad de la moneda a variaciones del mercado.

Gráfico 2. Inyección de energía neta por recurso e importaciones (Año 2020)



Fuente: Apraez, J. J., et al. Análisis del impacto ambiental por el consumo energético de bitcoin a nivel mundial. (2022).

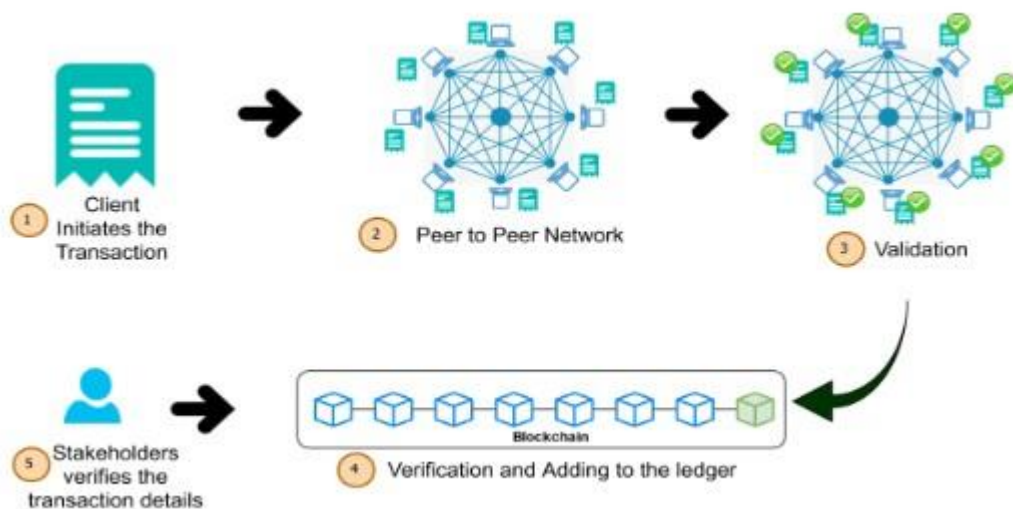
Gráfico 3. Fluctuaciones del valor de bitcoin (Año 2022)



Fuente: Katsiampa, P. “An empirical investigation of volatility dynamics in the cryptocurrency market”. (2019)

¿En general cómo se realiza el control de cada criptomoneda en el sistema? Tal control se realiza gracias a una base descentralizada, en la que una cadena de bloques actúa como libro mayor abierto al público con información almacenada en múltiples terminales conectadas en tiempo real, una red electrónica en la que poderosas computadoras llevan a cabo un complejo protocolo de validación llamado “*data mining*” o “minería de datos” (Useche, A.J.2022). En la Ilustración 2 se aprecia el funcionamiento grosso modo de tal mecanismo (Véase anexo 4).

Ilustración 2. Proceso de la cadena de bloques en bitcoin



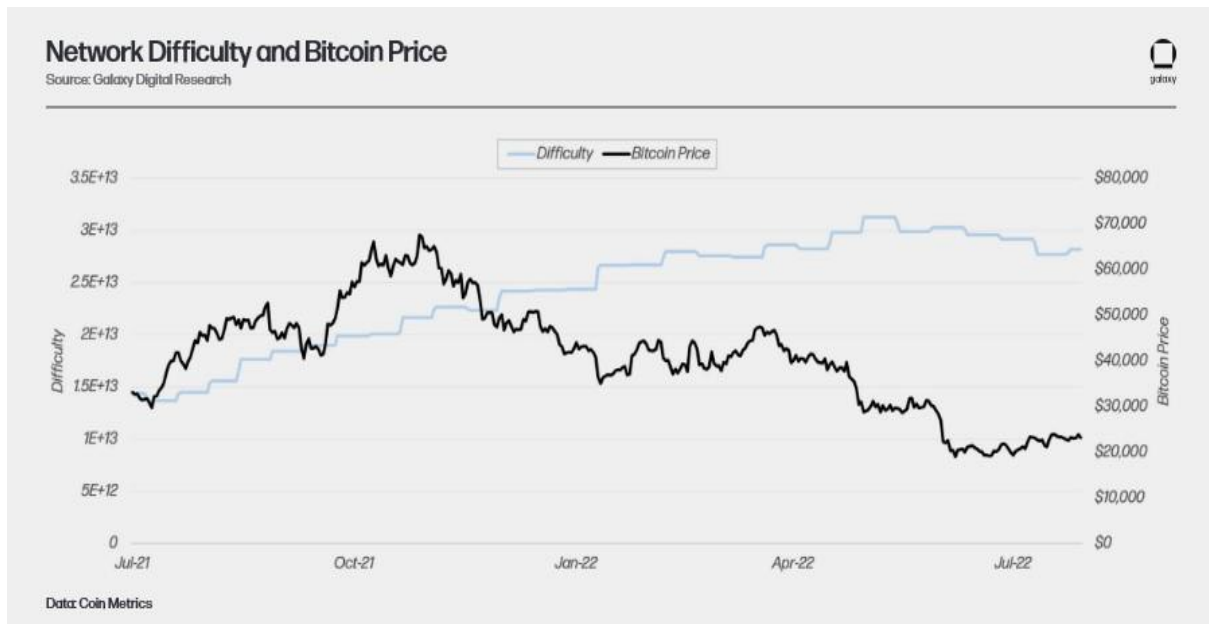
Fuente: MeitY, National Strategy of Blockchain. (2021), pp. 5

El cliente inicia la transacción, la red de “par a par” la procesa, valida, verifica y añade a la cadena de bloques, las partes interesadas verifican los detalles de la transacción. En el año 2008 surge en el mercado la primera criptomoneda denominada bitcoin, la primera forma de pagos descentralizada, es decir *“Una versión electrónica del efectivo que permite enviar pagos online de una parte a otra sin ir a través de una institución financiera”* (Nakamoto, 2008, p.1). Luego de eso y pasados 13 años desde su aparición, a finales del 2021, en el mercado existían más de 1000 criptomonedas que junto a otros activos digitales lograban llegar a una capitalización de mercado muy alta, llegando a 2.2 millones de millones de dólares estadounidenses (Market Cap, 2022).

Debido a que la base del funcionamiento de BTC es ser una moneda de carácter descentralizada, existe una imposibilidad de contar con estadísticos únicos que estimen el consumo de energía realizado por el mercado de cripto activos (de Vries, 2020). El portal Statista (2022) muestra que el consumo de energía para realizar una transacción de una unidad de bitcoin es de 2,188.59 kilovatios / hora, misma cantidad de energía que requiere la realización de 1,472,509 transacciones con tarjeta de crédito.

Un dato importante de considerar es el carácter finito de bitcoin y la relación que tiene eso con la demanda energética. La criptomoneda bitcoin tiene una oferta total definida que se ha establecido en 21 millones de unidades de los cuales, a junio del 2021, ya fueron minadas más del 90%, teniendo esto implicación directa con el consumo de energía, en cuanto que el diseño del sistema está planeado para ir aumentando la dificultad de minar de una forma exponencial, al mismo tiempo que existe mayor complejidad en la red debido a que se van sumando una cantidad mayor de mineros al sistema, lo que implica que se debe aumentar el poder de procesamiento y por ende los requerimientos de energía del mismo. En la Gráfica 4 (Dificultad de la red y precio del bitcoin), se ilustra de forma visual la relación existente entre el precio de la criptomoneda y el grado de exigencia para operar por parte de los mineros.

Gráfico 4. Dificultad de la red y el precio del bitcoin (Año 2022)



Fuente: Galaxy Digital Research. “2022 Mid-Year Bitcoin Mining Update”. (2022), pp 8

1.2.11. Razón de Ser del Método de Valoración Ambiental

Un método de valoración económico ambiental auxilia en la medición del impacto de la acción humana sobre el medio ambiente, pudiendo así direccionar la acción en el proceso de formación de las políticas ambientales (Hernández, et. al, 2014). De acuerdo con Costanza, et. al (1997), existen quienes perciben la valoración de los ecosistemas como imposible o desaconsejable, alegando que no es posible colocar un valor sobre elementos intangibles como el valor asociado al beneficio de mantener un recurso natural; mientras la medición y/o cuantificación que se sugiere en el presente trabajo de investigación por medio del MCP se refiere apenas a una forma de valoración, sin implicar la mercantilización o la privatización de cualquier recurso natural (Delacámara, G. 2008).

En la actualidad, en economía existen dos ramas que se dedican a estudiar las cuestiones atinentes al medio ambiente. Una de ellas es la economía ambiental y la otra es la economía ecológica. El punto que tienen en común entre ellas es que ambas persiguen la sustentabilidad, pero lo hacen desde distintos marcos teóricos.

Por ejemplo, la economía ambiental (EA) usa un enfoque neoclásico mientras que la economía ecológica usa un enfoque multidisciplinario. El análisis de la economía ambiental se centra en el estudio de las externalidades negativas, y en solucionar las fallas de mercado en términos del aprovechamiento óptimo de los recursos naturales (Seinfeld, J. et al 1998). Es así como dentro de este orden de ideas en la EA que se articula una de sus propuestas clave, que será el eje conductor del objetivo principal de la presente investigación, el cual consiste en asignarle un valor económico al recurso ambiental geotérmico salvadoreño, por medio de un sistema de valoración en base a un método basado en el cambio de productividad.

Por otra parte, otra de las diferencias marcadas entre ambas ramas yace en la forma de concebir y manejar el concepto de la escasez, que en economía es objeto de fuerte debate y que, tratándose de cuestiones ambientales, define un fuerte distanciamiento entre lo que se plantea por dichas ramas. La economía ambiental entiende que un recurso es escaso si es capaz de generar utilidad para las personas, mientras que la economía ecológica trata a todos los recursos como escasos. Así pues, también existen marcadas diferencias entre ambas ramas en lo concerniente a uno de los temas centrales de esta investigación, es decir a la asignación de valor económico a los recursos. La economía ambiental utiliza diferentes métodos en su valuación, teniendo en cuenta las preferencias de las personas (enfoque neoclásico, “costos de viaje”, etc.), mientras que la economía ecológica hace valuaciones alternativas que no necesariamente toman en cuenta dichas preferencias, siendo por ello que las políticas económicas en materia medioambiental pueden tener propuestas muy distintas en función de la base de su enfoque, sea ambiental o ecológico (Lomas, P. et al, 2005).

En cuanto a esta investigación, se centrará en el enfoque y métodos de la economía ambiental, por lo que se valdrá del uso de las distintas categorías de la economía neoclásica (criterios de eficiencia, racionalidad limitada, marginalismo, preferencia, etc.), así como del uso de los métodos de esta, como el cambio en la productividad desde el enfoque de costos de

reemplazo como herramienta para efectuar la valuación de los recursos naturales; para este caso el recurso geotérmico existente utilizado en la generación de energía eléctrica en El Salvador. Por consiguiente, el presente estudio se puede ubicar dentro del marco de la economía de los Recursos Naturales que a su vez se radica dentro de la Economía Ambiental, debido a que la economía de los recursos naturales consiste en aplicar los principios de la economía en el análisis de la extracción y uso de tales recursos, así como es el caso de las fuentes de energía geotérmica en El Salvador, con el fin de darle su uso más óptimo de forma sostenible; ergo gestión ambiental para orientar la política pública para tal fin (Gálvez, 2015).

En cuanto a este tipo de recursos, la economía de los recursos naturales hace una aseveración y delimitación entre lo renovable y no renovable como forma de categorizar a recursos como la energía geotérmica. Por ejemplo, para la economía de los recursos naturales es fundamental plantearse la diferenciación entre los recursos naturales renovables y los no renovables, siendo los renovables aquellos que aumentan o se mantienen constantes con el tiempo, es decir que se regeneran (pudiendo establecer la distinción entre recursos renovables vivos y no vivos)¹⁴, y los recursos no renovables aquellos cuya capacidad de reemplazo de forma natural, ya consumidos, suponen escalas de tiempo inasumibles para la vida humana¹⁵.

Concretamente, el presente trabajo sobre la energía que se produce utilizando recursos naturales provenientes de fuentes geotérmicas se ubica dentro del marco de los recursos naturales renovables no vivos, atendiendo el mismo sentido de “inagotable” como la energía solar, en función que la energía geotérmica proviene del calor emanado del núcleo del planeta (cuyo significado etimológico indica “geo” que significa “tierra” y “thermos”, calor).

¹⁴ Lo vivo, pese a ser un concepto aún por dirimir con entera precisión por la ciencia, para efectos de este trabajo puede entenderse por entes animados como animales, plantas, y otros organismos, dotados de vida al ser capaces de nacer, reproducirse y morir, en oposición a lo no vivo, materia y energía inanimada, como es el caso de la energía solar que recibe la tierra de manera continua, o el subsuelo de donde emana la energía geotérmica.

¹⁵ Katz (2020) refiere al concepto de “capacidad de carga” a cuánto puede explotarse un recurso.

Una de las ideas principales del enfoque a utilizar en esta investigación defiende la postura que los problemas ambientales son ocasionados por fallas de mercado de los recursos ambientales, al carecer este de mecanismos adecuados para establecer sus usos más óptimos y sostenibles por medio de una valoración apropiada. En particular, el escenario específico de El Salvador con el uso de energía geotérmica (para producir electricidad destinada a la producción de la criptomoneda bitcoin a través del minado de datos) supone un caso práctico que se abordará en el presente estudio. El hecho de que no exista un sistema de valoración específico para este tipo de recursos ambientales es una condición necesaria para dar origen a fallas de mercado en términos de la asignación no óptima de recursos.

Gómez (2004) plantea que cuando no existe mercado hay un vacío de información para la toma de decisiones de los individuos, que ha de completarse con algún tipo de información o indicio. El problema es que dichas conjeturas difícilmente se relacionan con la realidad objeto de estudio y, por lo tanto, la toma de decisiones que se deriva de dichas conjeturas, o de información incompleta, puede resultar en una asignación no óptima de recursos, como se pretende constatar para este caso en específico en la posible asignación de recursos geotérmicos en el proceso de minado de bitcoin en El Salvador. A causa de las fallas de mercado y la asignación no óptima de recursos mencionada anteriormente, esta investigación busca por medio de la economía ambiental proporcionar análisis e instrumentos de valoración económica que posibiliten corregir tales fallos de mercado, conduciendo a una mejor asignación y gestión del recurso geotérmico.

1.2.12. Métodos de Valoración Económica de los Recursos Naturales

Realizar la valoración económica ambiental de los recursos naturales (desde la perspectiva de la economía ambiental) presenta cierto nivel de complejidad, en cuanto que existe una singularidad entre las interrelaciones del conjunto de categorías y factores clave que en ella intervienen. La idea de asignar en términos cuantitativos los valores asociados en dichas

interrelaciones puede resultar inadecuada cuando esta se basa desde el enfoque de la privatización y mercantilización; por tal motivo es menester dejar establecido que dicho enfoque no forma parte del objeto del presente estudio por lo que, en contraposición, se hace uso del Valor Económico Total (VET).

El VET de un espacio natural o de un recurso natural hace referencia tanto a los beneficios comerciales como los ambientales que este aporta de forma directa e indirecta.

Con respecto al concepto clave del valor económico total se hace referencia a lo siguiente: *“El VET de un bien o servicio ambiental es aquel que no solo considera el valor de uso actual... sino también, el valor de uso futuro y el valor de existencia del bien”* (Montibeller - Filho. 2008). A partir de este concepto, ya es posible iniciar con la discusión sobre la complejidad de valorar un bien o recurso ambiental.

Uno de los instrumentos a través del cual se busca proporcionar un mejor análisis de la asignación óptima de recursos es por medio de la asignación de valor de los mismos, utilizando los **métodos de valoración económica** de los servicios ambientales. Siguiendo el mismo orden de ideas, dentro del marco de la economía ambiental surgen cuatro métodos de valoración económica de los recursos ambientales:

1. Los métodos de los costos evitados o inducidos
2. El método del costo de viaje
3. El método de los precios hedónicos
4. El método de la valoración contingente

Para efecto de esta investigación, se utilizará la metodología directa llamada Método de Cambio de la Productividad (MCP), el cual está ubicado dentro del método de costos evitados o inducidos.

1.2.13. Método de Cambio de Productividad de los Recursos Naturales

En lo que respecta al método de valoración, en el marco de la economía ambiental se ha identificado al **Método de Cambio en la Productividad** como un método adecuado por las características que posee.

Principalmente, dicho método se ubica dentro de los métodos de valoración económica ambiental directos, lo cual resulta clave ya que el objetivo es determinar el valor económico del recurso ambiental geotérmico que, como sus características indican para dichos bienes, no tiene un “precio” de mercado a priori establecido, puesto que no existe un mercado de recursos geotérmicos como tal¹⁶; a pesar que existe un mercado de energía eléctrica nacional del que dicho bien ambiental forma parte como insumo.

Este método corresponde al típico caso en que el bien o servicio ambiental bajo análisis no se comercia en el mercado, pero está relacionado con un bien que sí lo es, o sea, que posee un precio (Cristeche, E. & Penna, J. 2008).

En este contexto del método de valoración por cambio de la productividad (MCP) se admiten dos escenarios:

1. El bien o servicio ambiental es un insumo más dentro de la función de producción ordinaria de un bien o servicio privado.
2. El bien o servicio ambiental forma, junto con otros bienes y servicios, parte de la función de producción de utilidad de un individuo o una familia.

Basados en los dos escenarios anteriores, la presente investigación retoma la primera opción, donde el servicio ambiental objeto de estudio (recurso geotérmico) es un insumo más dentro de la función de producción ordinaria de un bien o servicio privado (energía eléctrica,

¹⁶ Willebald (2014), sostiene el concepto de “capital natural”, una forma alternativa de crear un mercado para tales recursos. Ramírez, R. Herrera, H. et al (2017) habla de un análisis costo-beneficio o “ACB”.

etc.). En muchos casos, los efectos ambientales de proyectos se manifiestan (al menos en parte) en cambios de productividad de bienes transables: la pérdida de bosques, por ejemplo, resulta en la pérdida de productos maderables, de leña, de forraje, y una variable de productos no maderables tales como frutos, hierbas y hongos (Dixon, J., Pagiola, S. 1998).

El objetivo central del estudio se concreta por medio del MCP, ya que se busca asignar valor económico al recurso ambiental geotérmico por medio del cambio de productividad del sistema con y sin uso de dicho recurso ambiental. Tal como menciona Dixon, J. en su ejemplo, la pérdida de bosque se puede valorar económicamente en función del precio de mercado del producto maderable que se dejó de producir.

Teniendo en cuenta lo anterior, y al proceso lógico que conlleva interrelacionar los elementos involucrados en un análisis desde el enfoque de MCP aplicado al proceso de valoración del recurso geotérmico en el marco del minado de bitcoin en El Salvador, se debe tener presente que se hará una *valoración marginal* de dicho recurso utilizado como insumo en términos de energía geotérmica aplicado a un sistema de producción agrícola, ya que se hace un análisis de la variación en la productividad del bien transable (producción agrícola) con el uso alternativo del recurso en cuestión, por ejemplo, la reducción en la disponibilidad de energía geotérmica en el sistema productivo como consecuencia de su uso alterno en el minado de criptomonedas. Dicho de otra forma, la cantidad de energía producida por fuentes geotérmicas que, permaneciendo invariable independientemente del uso que se haga de ella (minar bitcoin o destinarse a la producción agrícola de maíz), y observando un costo dado por unidad de kilovatio/hora (KWh) producido, puede ser empleado en el funcionamiento de una granja de minería de criptomonedas o para el consumo intermedio de industrias o consumo final residencial.

Teniendo en cuenta lo anterior, y a sabiendas de que El Gobierno de El Salvador (GOES) planea usar energía geotérmica para minar bitcoin en un 100%, dicha demanda de

energía de las granjas de bitcoin puede estimarse para multiplicarse por el costo de producción de 1 KWh y así obtener un estimado en valores económicos del requerimiento en este uso (y lo que produce en contrapartida), en contraste de la productividad mostrada por usos alternos más convencionales de la matriz productiva nacional.

En casos tales como los del bosque que se pierde, y por tanto la reducción en la producción maderable, el valor de los beneficios y costos puede ser estimado usando la técnica simple de valorar el cambio de productividad causado por el proyecto. La evaluación ambiental puede ser muy útil en lograr estimaciones de estos cambios; una vez que se dispone de estas estimaciones la valoración de los cambios es normalmente algo relativamente simple (Dixon, J., Pagiola, S. 1998).

1.2.14. Evaluación Ambiental: Recursos Naturales Empleados en la Generación de Energía en El Salvador

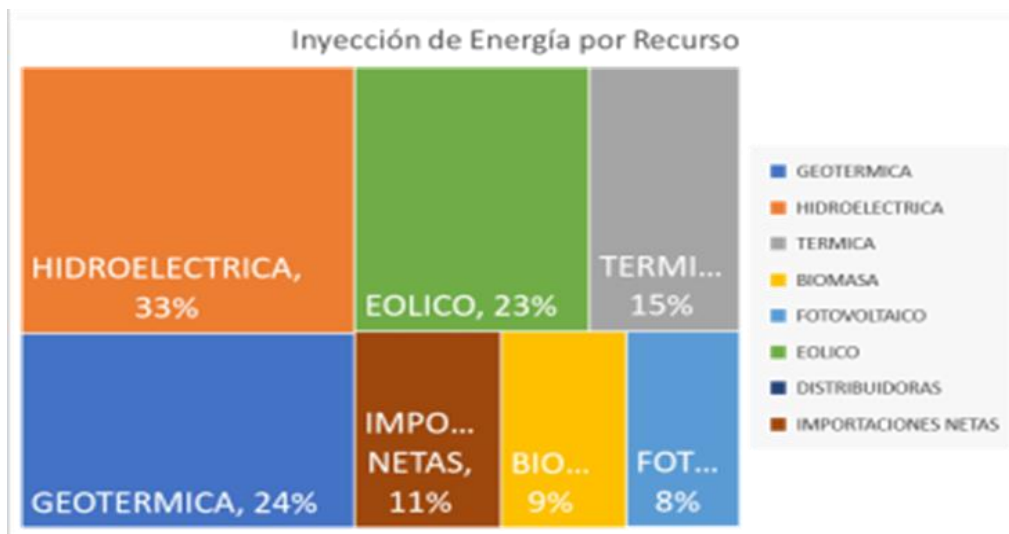
En cuanto al uso de las fuentes de energía (en parte condicionadas por la demanda de la misma en cada país), estas moldean una estructura energética según cada fuente posea distintos grados de participación en la demanda de esta, pudiendo o no exhibir cierta diversidad en dichas fuentes (primarias y secundarias, renovables y no renovables), lo que lleva a determinar una estructura energética nacional llamada “matriz energética”.

“La matriz energética es una representación cuantitativa de la totalidad de energía que utiliza un país, e indica la incidencia relativa de las fuentes de las que procede cada tipo de energía: nuclear, hidráulica, solar, eólica, biomasa, geotérmica o combustibles fósiles como el petróleo, el gas y el carbón” (CNE, s.f.).

En la gráfica 5. Inyección de energía neta por recurso e importaciones, se puede observar el aporte de cada recurso natural en la matriz energética nacional. En concreto, tal y como muestra el gráfico, la matriz energética refleja la capacidad instalada en El Salvador al

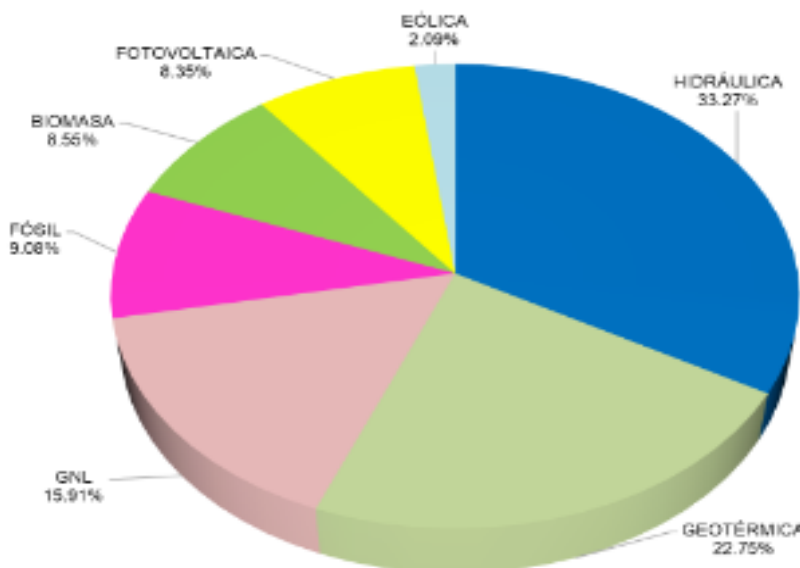
31 de diciembre del 2020, donde se observa el aporte del 24% de la energía geotérmica a la matriz, mientras el 11% de dichos aportes corresponden a importaciones de energía para suplir la demanda, dato de relevancia no menor. Además, se observa la importancia de otras fuentes de energía renovables, como las hidroeléctricas que aportan el 33% de la energía total, siendo ésta la de mayor relevancia hasta la fecha.

Gráfico 5. Inyección de energía neta por recurso e importaciones (Año 2020)



Fuente: Elaboración con base a Boletín de Estadísticas Eléctricas N.º 22 (2020), portal de SIGET. (2024)

Gráfico 6. Matriz energética por distribución-generación neta por recurso (Año 2022)



Fuente: Elaboración con base a Boletín de Estadísticas Eléctricas N.º 24 (2022), portal de SIGET. (2024)

Con base a la gráfica 6. Matriz energética... (Año 2022), se observa el aporte que tiene cada una de las fuentes de energía en la oferta energética en El Salvador; se aprecia que el gas natural licuado (GNL) alcanza a aportar casi el 16% de la matriz energética, esto por medio del proyecto privado “Energía del Pacífico”, que comenzó operaciones en 2022, lo que redistribuye el aporte de cada recurso natural. Para el presente caso en particular, vale resaltar que el recurso natural que se estudia (energía geotérmica) es un recurso energético que sigue siendo relevante, contribuyendo con el 22.75% de la matriz energética por distribución-generación neta por recurso para el año de 2022.

Del gráfico anterior, se puede concluir que cerca del 70% de la energía que El Salvador ocupa diariamente proviene de tres fuentes principales (gas natural licuado 15%, geotérmica 22%, hidroeléctrica 33%) en orden ascendente. Cabe destacar la creciente importancia que ha ido adquiriendo el recurso geotérmico en tiempos recientes para el sector productivo de El Salvador, para lo cual se busca seguir ampliándolo con proyectos de expansión en San Vicente, Conchagua, Chinameca y una nueva expansión en Berlín (véase anexos 5-6).

En la tabla 1. Precio de mercado de energía promedio en El Salvador (véase anexo 7), se muestra el precio de mercado de la energía en El Salvador para el año 2021¹⁷, donde se puede apreciar que el nivel más alto del precio se alcanza en los meses finales del año, no obstante, como promedio anual éste ronda en los \$103.64 por MWh. Para efectos de aclaración, en el sector energético la unidad de medida son los vatios (W)¹⁸. En ese sentido y para efectos prácticos, se procederá a efectuar la conversión del precio por kWh, que en este caso se puede establecer que el precio promedio anual en dicha medición es de USD \$0.10 por kWh (véase la siguiente página, y anexo 8 para la configuración del sistema de transmisión de electricidad).

¹⁷ En un mercado-país en el que según DIGESTYC (2022), el 98.2% de los hogares tienen acceso a electricidad.

¹⁸ Al hablar de kilovatios (kW) se está haciendo referencia a 1000 vatios; en este caso al tratarse de megavatios (MW) se estaría hablando de 1 millones de vatios.

**Tabla 1. Precio de mercado de energía promedio en El Salvador (Base en US\$/MWh)
(Año 2021)**

MES	(US\$/MWh)
Enero	68.39
Febrero	81.04
Marzo	101.56
Abril	106.86
Mayo	117.18
Junio	113.84
Julio	107.54
Agosto	81.17
Septiembre	83.98
Octubre	130.71
Noviembre	129.35
Diciembre	122.04
Promedio Anual	103.64

Fuente: Elaborado con base a datos estadísticos de UT. (2022): <https://www.ut.com.sv/reportes>

1.3. Marco Normativo y Legal

La siguiente lista comprende el conjunto de leyes más relevantes en el ordenamiento jurídico-legal salvadoreño, en las que se encuentra inmersa la problemática de la falta de un sistema de valoración económica del recurso geotérmico como insumo para la generación de energía eléctrica en El Salvador como base para el minado de bitcoin:

- Constitución de la República de El Salvador (en lo atinente a la problemática).

- Marco del Sector Energético (Ley General de Electricidad, en lo relacionado a recursos geotérmicos, y el bitcoin).
- Marco Legal del Bitcoin (Ley Bitcoin).
- Ley General de Medio Ambiente (en lo concerniente a recursos energéticos geotérmicos).

1.3.1. Constitución de la República de El Salvador¹⁹

A pesar que el bitcoin circula como moneda de curso legal en nuestro país, todavía se aprecia un cierto grado de incertidumbre en cuanto a su uso por parte de los salvadoreños. Sin embargo, a la luz de la Constitución de la República de El Salvador, el bitcoin parece contravenir algunas disposiciones jurídicas en ella establecidas, tanto a lo referente a la moneda de curso legal, así como también en su carácter de uso obligatorio para aquellos que poseen la tecnología y condiciones necesarias para su aprovechamiento.

El Artículo 23 por ejemplo, expresa: *“Se garantiza la libertad de contratar conforme a las leyes. Ninguna persona que tenga la libre administración de sus bienes puede ser privada del derecho de terminar sus asuntos civiles o comerciales por transacción o arbitramento. En cuanto a las que no tengan esa libre administración, la ley determinará los casos en que puedan hacerlo y los requisitos exigibles”*.

Pese a que la Ley Bitcoin prevé el mandato obligatorio del uso de dicha criptomoneda como moneda de curso legal, la finalidad de dicho artículo parece entrar en contradicción contra el carácter forzado que se pretende dar a dicha moneda. Por otra parte, el Artículo 101 proporciona el marco legal en el que, esfuerzos como un sistema de valoración de los recursos naturales, tendrían un lugar en El Salvador. Dicho artículo reza: *“El orden económico debe responder esencialmente a principios de justicia social, que tiendan a asegurar a todos los*

¹⁹ La Constitución entró en vigor en el año de 1983.

habitantes del país una existencia digna del ser humano. El Estado promoverá el desarrollo económico y social mediante el incremento de la producción, la productividad y la racional utilización de los recursos. Con igual finalidad, fomentará los diversos sectores de la producción y defenderá el interés de los consumidores”.

En cuanto a especie monetarias, el Artículo 111 de la Carta Magna reza lo siguiente: *“El poder de emisión de especies monetarias corresponde exclusivamente al Estado, el cual podrá ejercerlo directamente o por medio de un instituto emisor de carácter público. El régimen monetario, bancario y crediticio será regulado por la ley. El Estado deberá orientar la política monetaria con el fin de promover y mantener las condiciones más favorables para el desarrollo ordenado de la economía nacional”.*

Por ser una moneda descentralizada, no hay gobierno que pueda ejercer facultades emisoras con respecto a la misma. Por otra parte, en “el espíritu de la ley”²⁰ de los Artículos 113, así como el 117 y 118, se encuentra el basamento legal del aprovechamiento de los recursos naturales como la energía geotérmica. Tales artículos son:

Art. 113: *“Serán fomentadas y protegidas las asociaciones de tipo económico que tiendan a incrementar la riqueza nacional mediante un mejor aprovechamiento de los recursos naturales y humanos, y a promover una justa distribución de los beneficios provenientes de sus actividades. En esta clase de asociaciones, además de los particulares, podrán participar el Estado, los municipios y las entidades de utilidad pública”.*

Art. 117: *“ES DEBER DEL ESTADO PROTEGER LOS RECURSOS NATURALES, ASÍ COMO LA DIVERSIDAD E INTEGRIDAD DEL MEDIO AMBIENTE, PARA GARANTIZAR EL DESARROLLO SOSTENIBLE. SE DECLARA DE INTERÉS SOCIAL LA PROTECCIÓN, CONSERVACIÓN, APROVECHAMIENTO RACIONAL, RESTAURACIÓN O*

²⁰ La intención final del legislador.

SUSTITUCIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES, EN LOS TÉRMINOS QUE ESTABLEZCA LA LEY. SE PROHÍBE LA INTRODUCCIÓN AL TERRITORIO NACIONAL DE RESIDUOS NUCLEARES Y DESECHOS TÓXICOS” (sic).

Art. 118: *“El Estado adoptará políticas de población con el fin de asegurar el mayor bienestar a los habitantes de la República”.*

Finalmente, el inciso 13) del Artículo 131, establece sobre quién recae el poder decisorio en la selección de las monedas de curso legal, al declarar: *“Corresponde a la asamblea legislativa” “Establecer y regular el sistema monetario nacional y resolver sobre la admisión y circulación de la moneda extranjera”.*

1.3.2. Marco Legal del Sector Energético²¹

El marco normativo o cuerpo de leyes que regulan la generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica en El Salvador se ha visto reformada en diversas ocasiones, buscando principalmente la modernización de la política energética desde un enfoque neoclásico y desde la lógica de los programas de ajuste estructural aplicados en el país. La reforma del sector energético de 1991 en El Salvador ha sido orientada por la Carta de Política Energética del Gobierno. En dicha carta se establecen las bases del Programa de Ajuste Estructural (PAE) de la economía, cuyos lineamientos más sobresalientes en términos energéticos son: i) incrementar la eficiencia de las empresas públicas y asegurar su autonomía financiera; ii) reducir la participación estatal en las actividades comerciales incrementando la participación del sector privado; iii) liberalizar los precios de los energéticos comerciales, así como establecer procedimientos eficientes y estables para la regulación de precios de la energía producida por monopolios naturales; iv) promover nuevas fuentes de energía; y v) cuidar del medio ambiente en todas las actividades relacionadas con el sector.

²¹ Basado en hechos de conocimiento y dominio público, así como en la Ley General de Electricidad, (1996).

La aplicación de la reforma energética afectó directamente al marco institucional, debido a que tenía por objeto adecuar la estructura de formulación, ejecución, regulación y fiscalización de la política energética. Por otra parte, buscaba definir un organismo regulador, especialmente para los energéticos producidos por monopolios naturales. Es así como surgió la idea de la creación del Consejo Nacional de Energía (CNE)²² y la Comisión Reguladora de Electricidad e Hidrocarburos (CREH). El CNE se vería conformado por diversos ministros del Gobierno; el objetivo central sería: analizar, formular y dar seguimiento a la política energética nacional. Por otro lado, la CREH surgió como una institución de derecho público que se adscribe directamente al Ministerio de Economía. Su objetivo central es velar por el exacto cumplimiento de la Ley General de Electricidad y la Ley General de Hidrocarburos, teniendo a su cargo la regulación de los precios de los productos energéticos ahí consignados. Así mismo, en 1991 la ya referida reforma da origen a la Unidad de Transacciones, cuyo objetivo es definir el despacho de carga en el sector eléctrico de acuerdo a criterios de eficiencia económica; en la práctica sería el responsable de la configuración de un mercado competitivo de generación de electricidad.

De la reforma anterior surge la actual *Ley General de Electricidad*, donde y como se ha visto anteriormente, tiene a su base los PAE en materia energética, cuya finalidad declarada es la **modernización del sector energético**. Como resultado en el Capítulo 1, Artículo 1 reza así: *“La presente ley norma las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica. Sus disposiciones son aplicables a todas las entidades que desarrollen las actividades mencionadas, sean estas de naturaleza pública, mixta o privada, independientemente de su grado de autonomía y régimen de constitución”*. Por otra parte, la ley de creación de la SIGET tiene un rol fundamental en la búsqueda del uso eficiente

²² Véase anexos 9-11 para más detalles de su organigrama (junto al del mercado regional).

de los recursos energéticos, así como el cumplimiento de toda la normativa vigente. De acuerdo a la misma ley se describe cual es la competencia de la SIGET en el Capítulo II y Art. 4, detallando lo siguiente: *“La SIGET es la entidad competente para aplicar las normativas contenidas en tratados internacionales sobre electricidad y telecomunicaciones vigentes en El Salvador; en las leyes que rigen los sectores de Electricidad y Telecomunicaciones; y sus reglamentos; así como para conocer el incumplimiento de las mismas”*.

Así mismo, la SIGET tiene un marco de referencia para actuar en la búsqueda del cumplimiento de todas sus obligaciones por medio del *Reglamento de la Ley General de Electricidad*, tal y como se detalla en las disposiciones generales y el Art. 4 donde se indica lo siguiente: *“El presente reglamento desarrolla los procedimientos necesarios para el cumplimiento de lo dispuesto en la Ley General de Electricidad, en adelante “La Ley”. La Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones, en adelante “La Superintendencia”, o “La SIGET”, es la responsable de su cumplimiento. Para finalizar, La Ley de Electricidad fue en parte modificada para facilitar la minería de criptomonedas. Según reformas aplicadas en los artículos 1,4,5,10,78 y 79 de la ley, entre ellas se encuentran los precios de las tarifas de electricidad (Art. 78): “Los operadores de redes de distribución que actúen como comercializadores en el área geográfica donde se ubican sus redes, deberán presentar anualmente a la SIGET para su aprobación, un pliego tarifario que contenga los precios y condiciones de suministro de energía eléctrica, de acuerdo con el nivel de voltaje, estacionalidad y distribución horaria del uso de ésta”²³.*

1.3.3. Marco Legal del Bitcoin²⁴

El nuevo marco legal reconoce al bitcoin como una moneda de curso legal en el país. La ley ampara, además, que la criptomoneda sea con irrestricto poder liberatorio, ilimitada

²³ Véase en anexo 11 una esquematización general de las interrelaciones en el ramo de la energía geotérmica.

²⁴ Basado en la Ley Bitcoin, (2021).

en cualquier transacción y a cualquier título. Bitcoin es un sistema que utiliza la tecnología “Peer-2-Peer”, o también conocido como “sistema de pares distribuidos”, lo cual indica que no existe un ente central que controle lo que sucede en el sistema. Los bitcoins se crean a través de la minería, un protocolo de recompensas por la resolución de problemas matemáticos complejos, que a su vez procesan las transacciones y movimientos de la red.

El Salvador se convierte en el primer país del mundo en reconocer al bitcoin como moneda de curso legal. Para ello la Asamblea Legislativa discute el proyecto de ley para permitir la utilización del bitcoin en el país, ergo el marco legal que debería legalizar el correcto funcionamiento y cumplimiento de los objetivos de dicha iniciativa (generar dinamismo económico, empleo, aumento de remesas e inclusión financiera).

La Asamblea Legislativa decretó el 8 de junio de 2021 un total de 10 artículos con las siguientes disposiciones generales:

- ❖ Art 1: La ley tiene como objeto la regulación del bitcoin como moneda de curso legal, irrestricto con poder liberatorio, ilimitado en cualquier transacción y a cualquier título.
- ❖ Art 2: El tipo de cambio entre el bitcoin y el dólar de Estados Unidos será establecido libremente por el mercado.
- ❖ Art 3: Todo precio podrá ser expresado en bitcoin.
- ❖ Art 4: Las contribuciones tributarias podrán ser pagadas en bitcoin.
- ❖ Art 5: Los intercambios en bitcoin no estarán sujetos a impuestos sobre las ganancias de capital al igual que cualquier moneda de curso legal.
- ❖ Art 6: Para fines contables se utilizará el dólar como moneda de referencia.
- ❖ Art 7: Todo agente económico deberá aceptar bitcoin como forma de pago cuando así le sea ofrecido por quien adquiere un bien o servicio.

- ❖ Art 8: Sin perjuicio del accionar del sector privado, el Estado promoverá alternativas que permitan al usuario llevar a cabo transacciones en bitcoin, así como contar con convertibilidad automática e instantánea de bitcoin a dólares en caso de que lo desee.
- ❖ Art 9: Las limitaciones y funcionamiento de las alternativas de conversión automática e instantánea de bitcoin a dólar provistas por el Estado serán especificadas en el reglamento que al efecto se emita.
- ❖ Art 10: El Órgano Ejecutivo creará la estructura institucional necesaria a efectos de aplicación de la presente ley.

Es de conocimiento general que a la fecha de finalización de esta investigación (2024) esta ley es el único marco legal hasta el momento relacionado al bitcoin, estando sus disposiciones generales orientadas a promover el uso de la criptomoneda en el país. En los diez artículos se encuentran disposiciones en términos de regulación, contabilidad, impuestos, accesibilidad y a buscar que su aceptación por la economía tradicional e informal.

1.3.4. Ley General de Medio Ambiente²⁵

El Art. 1 de la Ley de Medio Ambiente de El Salvador dice: *“La presente ley tiene por objeto desarrollar las disposiciones de la Constitución de la República, que se refieren a la protección, conservación y recuperación del medio ambiente; el uso sostenible de los recursos naturales que permitan mejorar la calidad de vida de las presentes y futuras generaciones; así como también, normar la gestión ambiental, pública y privada y la protección ambiental como obligación básica del Estado, los municipios y los habitantes en general; y asegurar la aplicación de los tratados o convenios internacionales celebrados por El Salvador en esta materia”*.

²⁵ Basado en la Ley de Medio Ambiente, (1998).

El Art. 2, literal I reza: *“En los procesos productivos o de importación de productos deberá incentivarse la eficiencia ecológica, estimulando el uso racional de los factores productivos y desincentivando la producción innecesaria de desechos sólidos, el uso ineficiente de energía, del recurso hídrico, así como el desperdicio de materias primas o materiales que pueden reciclarse”*.

A su vez, el Art 65 dispone: *“El uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables, deberá asegurar la sostenibilidad del mismo, su cantidad y calidad, protegiendo adecuadamente los ecosistemas a que pertenezcan...”*. En general, las disposiciones legales establecidas en la Ley de Medio Ambiente, están encaminadas a establecer el marco normativo y procedimental en lo referente a nivel nacional, de la disposición, uso y gestión de los recursos naturales vivos e inanimados²⁶ con criterios de sostenibilidad en el largo plazo.

1.4. Marco Contextual

1.4.1. Energía Geotérmica²⁷

La geotermia es el aprovechamiento de la energía almacenada en forma de calor bajo la tierra sólida. De hecho, el significado etimológico de geotermia es “calor de la tierra”. Hace cuatro mil quinientos millones de años atrás²⁸, la Tierra era una inmensa masa ardiente de gases, polvos, y fluidos, cuando dicho cuerpo celeste se enfrió, se formó una corteza dura que atrapó en su interior una ingente cantidad de calor (denominado “calor primordial”) que, junto al calor radiogénico producido por la desintegración radiactiva de ciertos materiales contenidos en su manto y en su corteza, posibilitó en la actualidad la formación de “calderas naturales”, de las cuales es posible aprovechar dicha emisión de energía térmica para usos comerciales.

²⁶ La ley carece de disposiciones específicas y explícitas sobre los recursos geotérmicos. Para más detalles, consúltese la Ley de Medio Ambiente.

²⁷ Todo lo expresado en esta sección son hechos de conocimiento público.

²⁸ Hecho de conocimiento general en geología, datación radiométrica por uranio 238 de la edad del planeta.

La **energía geotérmica** es una de las fuentes de energía renovable menos conocidas, encontrándose almacenada bajo la superficie terrestre en forma de calor, y ligada a los volcanes, aguas termales, fumarolas y géiseres. Es decir, a diferencia de otras formas de energías renovables cuyo origen es la radiación solar (ya sea de forma directa como la solar térmica y fotovoltaica, o de forma indirecta como la eólica, hidroeléctrica y biomasa), la energía geotérmica proviene del calor interno de la propia Tierra; un calor que se alimenta, por un lado de la desintegración de isótopos radiactivos; y, por otro, de movimientos diferenciales entre las distintas placas tectónicas, junto al calor primordial de la formación del planeta.

El sector energético juega un papel importante en El Salvador para atraer inversiones y dinamizar la economía; es por ello que el desarrollo de fuentes de energía como la geotérmica puede contribuir a estabilizar las tarifas eléctricas, reducir importaciones de petróleo, y con ello, la vulnerabilidad de la economía nacional ante las variaciones de los precios internacionales del crudo y los costos de la electricidad. La geotermia es una de las fuentes de energía más innovadoras en el país. Data desde los 70's con la creación de la primera central geotérmica en Ahuachapán, que junto con la de Usulután, brindan el 22% de la electricidad consumida en el mercado salvadoreño (2022), suministrando una de las fuentes de energía más estable a un costo relativamente bajo, con escasos riesgos operativos y tecnológicos.

Ya a principios de septiembre de 2021, el presidente Bukele había anunciado sus intenciones de emplear la energía geotérmica para el minado de bitcoin en El Salvador, esto con el fin principal de generar una fuente de ingresos alternativa para el Estado, y a su vez, en miras de disponer una fuente de obtención del circulante en cuestión, en este caso la criptomoneda bitcoin. El objetivo declarado por el GOES en vistas de la implementación del bitcoin como moneda de curso legal a nivel nacional, es dedicar una parte específica de los recursos energéticos geotérmicos (y su infraestructura), para suplir las necesidades en electricidad que el minado de bitcoin pueda requerir en El Salvador.

1.4.2. Bitcoin en la Economía Salvadoreña²⁹.

En septiembre de 2021, la administración del presidente Nayib Bukele, con el fin declarado de elevar la inclusión financiera (aumentando el nivel de bancarización de la población salvadoreña), dinamizar el consumo y el turismo, aprueba la Ley Bitcoin con la cual, la criptomoneda creada por Satoshi Nakamoto pasa a ser moneda corriente de curso legal en El Salvador.

Con el fin de facilitar su uso, el Gobierno de El Salvador (GOES) lanza su propia billetera electrónica o “criptowallet” (denominada “Chivo Wallet”), junto a un bono inicial de \$30 dólares a cada nuevo usuario de la aplicación, lo que se presupuestó en USD \$30 Millones. El software Chivo Wallet, creado mayormente por la empresa estadounidense “Athenea”, más los 255 cajeros y puntos de venta (con una inversión de USD \$4.7 Millones según informe de la Comisión de Bolsa y Valores de Estados Unidos SEC), más los USD 150 Millones para el fideicomiso que manejó el Banco de Desarrollo de El Salvador BANDESAL (utilizados para convertir bitcoin a dólares y viceversa), entre otros servicios resultaron en la cifra oficial para la implementación del bitcoin en USD 205.3 Millones, todo ello orientado a incentivar por parte del gobierno la adopción de la criptomoneda en las transacciones nacionales diarias.

La ley consta de 10 disposiciones generales, y 6 transitorias, siendo el Artículo 8 el que reza: *“Sin perjuicio del accionar del sector privado, el Estado proveerá alternativas que permitan al usuario llevar a cabo transacciones en bitcoin, así como contar con convertibilidad automática e instantánea de bitcoin a dólar en caso que lo desee”*. Se deduce la responsabilidad que asume el GOES de proveer a la población con los medios necesarios para la utilización del bitcoin en el día a día, incluyendo más no limitándose, a la generación o importación de la energía eléctrica requerida que dé soporte a la red nacional bitcoin.

²⁹ Todo lo expresado en esta sección son hechos de conocimiento público.

1.4.3. Sistema de Valoración Económica

En el contexto actual, en El Salvador se está impulsando el proyecto del minado de criptomoneda con el objetivo de beneficiarse de los precios de dicha criptomoneda, buscando obtenerse así beneficios del proceso en sí. El gobierno ha planteado hacer funcionar tal proyecto utilizando energía eléctrica proveniente del recurso geotérmico para así reducir el impacto ambiental, ya que como se ha mencionado anteriormente es energía renovable y limpia. Sin embargo, el problema del minado de bitcoin (y una de las razones por la cual su práctica está prohibida en muchos países), radica en su alto consumo de energía y su carácter sensiblemente especulativo.

Entonces, y bajo la luz de dicha problemática, es necesario plantearse la interrogante ¿Qué beneficios trae minar bitcoin, y qué beneficios se dejan de percibir -en otros sectores económicos- al emplear la energía geotérmica en dicha actividad?, ¿Qué uso es mejor en términos de productividad?, ¿Qué actividad económica le asigna un mayor valor al recurso geotérmico? Bajo dicho contexto, se plantea la oportunidad de valorar tal recurso en términos de productividad por medio del MCP, para asignar un valor de forma indirecta al recurso geotérmico, esto con el fin de poder recomendar lineamientos sobre el uso más eficiente del recurso, mejorando de esta forma la gestión y asignación que se hace del mismo.

II. SISTEMA DE VALORACIÓN ECONÓMICA DEL RECURSO GEOTÉRMICO COMO BASE PARA EL MINADO DE BITCOIN EN EL SALVADOR.

2.1. Generalidades del Sujeto de Estudio

- Ficha Resumen del Sujeto de Estudio #1

<p>► <u>Generalidades del sujeto de estudio #1</u></p> <ul style="list-style-type: none">► Nombre: Recursos Geotérmicos► Ubicación: El Salvador, depto. Ahuachapán, distrito de Ahuachapán.► Tamaño de campo geotérmico:<ul style="list-style-type: none">► Ahuachapán: 2.5 km²► Inicio operaciones: Año 1972	
Capacidad instalada: 95 MW	
Aporte a matriz energética: 10.6 %	
Pozos productores: 23 Reinyectores: 9	
Profundidad pozos: 591 - 2,839 mt	

- Ficha Resumen del Sujeto de Estudio #2

<p>► <u>Generalidades del sujeto de estudio #2</u></p> <ul style="list-style-type: none">► Nombre: Recursos Geotérmicos► Ubicación: El Salvador, depto. Usulután, distrito de Berlín.► Tamaño de campo geotérmico:<ul style="list-style-type: none">► Berlín: 8.0 km²► Inicio operaciones: Año 1992	
Capacidad instalada: 109 MW	
Aporte a matriz energética: 12.3 %	
Pozos productores: 17 Reinyectores: 25	
Profundidad pozos: 500 - 3,455 mt	

- **CUADRO RESUMEN DE LOS SUJETOS DE ESTUDIO**

NOMBRE:	Recursos geotérmicos para la generación de energía eléctrica de El Salvador; plantas geotérmicas de Ahuachapán y de Berlín respectivamente.
UBICACIÓN GEOGRÁFICA:	República de El Salvador, departamentos de Ahuachapán y Usulután; distritos de Ahuachapán y de Berlín correspondientemente.
TAMAÑO:	Campo geotérmico de Ahuachapán 2.5 km ² ; Campo geotérmico de Berlín 8 km ² .
HISTORIA Y OTRAS PARTICULARIDADES:	Organización administradora: LaGeo, empresa estatal de El Salvador (administradora de ambos campos). La planta de Ahuachapán inició operaciones en 1972; actualmente cuenta con una capacidad instalada de 95 MW, aportando el 10.6% de la matriz energética salvadoreña con 23 pozos productores y 9 reinyectores, en un rango de profundidad de 591 – 2839 mts. La planta de Berlín inició operaciones en 1992; cuenta con una capacidad instalada de 109 MW, aportando el 12.3% de la matriz energética nacional con 17 pozos productores y 25 reinyectores en un rango de profundidad de 500 – 3455 mts.

2.2. Desarrollo del Sistema de Valoración Económica del Recurso Geotérmico

El objetivo de un sistema de valoración económica es facilitar la toma de decisiones basadas en datos estadísticos sobre la asignación óptima de recursos escasos. Un sistema de valoración económica se basa en el principio de que los individuos tienen preferencias por los bienes y servicios ambientales, y que estas preferencias se pueden expresar en términos monetarios mediante diferentes métodos, cómo es el Método de Cambios en la Productividad. El uso del MCP para desarrollar un sistema de valoración económica del recurso ambiental geotérmico se basa en la idea de que la energía geotérmica -como insumo-, puede aumentar la productividad (mayor número de unidades producidas) de sistemas agrícolas, industriales y de servicios.

2.2.1. Establecimiento de Objetivos

- Estimar la valoración económica del recurso ambiental geotérmico (como insumo de la energía eléctrica) en El Salvador proveniente de las centrales geotérmicas de Ahuachapán y Usulután.
- Determinar la productividad de los sistemas agrícolas salvadoreños y de los sistemas de minado de bitcoin con el uso del recurso ambiental geotérmico.
- Facilitar la toma de decisiones sobre la asignación eficiente del recurso geotérmico en términos de productividad.
- Fundamentar la conveniencia de migrar a fuentes de energías más eco-amigables.

2.2.2. Ventajas y Desventajas del Uso de la Energía Geotérmica

Ventajas

- La energía geotérmica es renovable, lo que significa que se puede utilizar sin riesgos de agotar las fuentes subterráneas de calor.

- Están disponibles de forma global, aunque no en todos los países es rentable su explotación.
- Su impacto ambiental es mínimo, ya que la mayoría de las plantas geotérmicas solo emiten vapor.
- No depende de factores climáticos, por lo que está disponible de forma permanente.

Desventajas

- En algunos casos, las perforaciones pueden afectar la estabilidad del terreno.
- Si no se toman las precauciones necesarias, algunas sustancias tóxicas que están presentes en las profundidades de la tierra pueden contaminar las fuentes de agua.
- El costo inicial para la producción de energía geotérmica es muy alto.
- No todos los países tienen los mismos recursos.

Fuente: Oficina de Eficiencia Energética y Energía Renovable de los Estados Unidos (EERE). (2024).

2.2.3. Ecuación del Método de Cambio en la Productividad

El método que se va a desarrollar en este apartado cuenta con una ecuación simple, pero a la vez con alto alcance, que muestra las relaciones directas entre el cambio en la productividad y el valor de la productividad, para encontrar el valor económico del recurso ambiental geotérmico que se está estimando.

Ecuación de cambio en la productividad

$$\underline{\text{Valor Económico} = \sum(\Delta\text{Productividad}) \times \text{Precio}}$$

Valor Económico = Cambio en la Productividad x Valor de la Productividad

Sigue...

... continua:

$$\mathbf{VE = CP \times VP}$$

$$\mathbf{VP = P}$$

$$\mathbf{CP = P2 - P1}$$

Donde:

VE = Valor económico

CP = Cambio en la productividad

VP = Valor de la productividad

P = Precio

Q = Cantidad

P1 = Producción sin uso de energía geotérmica

P2 = Producción con uso de energía geotérmica

El cambio en la productividad se calcula comparando la productividad de un sistema con y sin el uso de la energía geotérmica³⁰. El valor de la productividad se calcula utilizando el precio de mercado de los productos o servicios cuya producción se ha visto afectada por el cambio en el recurso ambiental.

2.2.4. Pasos para Aplicar la Ecuación del Cambio en la Productividad.

- 1. Identificar el cambio en la productividad:** Determinar cómo el recurso ambiental afecta la productividad de la actividad económica. Por ejemplo, al estar evaluando el recurso geotérmico, se medirá cómo los cambios en la cantidad de energía suministrada afectan la producción agrícola (o cuánta es la productividad entre distintos usos).

³⁰ Este paso puede abreviarse para fines prácticos si sólo se desea comparar los distintos VP de distintos usos.

2. **Medir la cantidad del cambio:** Cuantificar el cambio en los niveles de producción (p. ej. quintales por cultivo producido) que se atribuyen directamente al recurso ambiental.
3. **Determinar el precio de mercado:** Obtener el precio de mercado actual del producto afectado por el cambio en el recurso suministrado.
4. **Calcular el valor económico:** Esto se logra por medio de la multiplicación del cambio en la productividad -variación de unidades-, por el precio de mercado para obtener el valor económico atribuible al recurso ambiental en cuestión (el geotérmico).

Para aplicar este método, es necesario identificar los sistemas que pueden beneficiarse del uso de la energía geotérmica.

2.2.5. Identificación de Sectores que Pueden Beneficiarse en El Salvador

- **Agricultura:** La energía geotérmica puede utilizarse para calentar invernaderos, dar potencia a sistemas de riego y otros equipos agrícolas. Esto puede aumentar la productividad de los cultivos y el ganado.
- **Industria:** La energía geotérmica puede utilizarse para generar electricidad, calefacción y refrigeración industrial. Esto puede aumentar la eficiencia de los procesos industriales y reducir los costos de producción.
- **Servicios:** La energía geotérmica puede utilizarse para iluminación y refrigeración de edificios comerciales y residenciales.

Ahora que se ha identificado que en El Salvador se puede aplicar a estos tres sectores potenciales, es necesario realizar una estimación del cambio en la productividad que se obtendría sin el uso y con el uso de la energía geotérmica. Para enfocar las estimaciones a un caso en concreto, se ha determinado la aplicación del método a un sector potencial en particular, a nivel de mejoras potenciales en su productividad, dicho caso de estudio será el sector agrícola (concretamente el cultivo de maíz).

2.2.6. Aplicación de Pasos de la Ecuación: Un Modelo Econométrico

a) Identificar el cambio en la productividad

1. Variable dependiente:

- Productividad agrícola (rendimiento por unidad de superficie, quintales por manzana producida).

2. Variable independiente:

- Cantidad de energía geotérmica utilizada.
- Inversión en infraestructura geotérmica especializada para el sector agrícola.
- Gastos operativos relacionados con el uso de energía geotérmica.

3. Variables de control:

- Condiciones climáticas (precipitaciones, temperatura, etc.)
- Calidad del suelo y prácticas agrícolas (fertilización, rotación de cultivos)
- Inversión en otras estructuras agrícolas (sistemas de riego, maquinaria)
- Niveles de mano de obra
- Precios de los insumos agrícolas
- Políticas agrícolas y subsidios que podrían afectar la productividad

4. Especificación del modelo:

Se opta por utilizar un modelo de regresión lineal del tipo:

$$\text{Productividad}_{it} = \beta_0 + \beta_1(\text{Energía Geotérmica}_{it}) + \varepsilon_{it}$$

Donde:

- $\text{Productividad}_{it}$: es la productividad agrícola en la región i en el tiempo t
- $\text{Energía Geotérmica}_{it}$: representa el uso de energía geotérmica
- β_0 : Es el valor del intercepto
- β_1 : vector que determina el grado en que X explica Y

- ε_{it} : es el término de error que captura los efectos no observados y los errores de medición

5. Estimación y pruebas:

- Se estimó el modelo utilizando mínimos cuadrados ordinarios (MCO)
- Se realizó pruebas de hipótesis para la significancia de los coeficientes

Es importante tener en cuenta que la disponibilidad y calidad de los datos limitan en cierto grado la especificación del modelo. Por tal razón, se retomaron datos oficiales de las instituciones pertinentes y especializadas en temas de producción de energía en El Salvador (véase anexos 12-13). Además, la interpretación de los resultados se realizó con cautela, considerando el contexto y las posibles limitaciones del análisis econométrico.

b) Identificar el cambio en la productividad

Para estimar el efecto del recurso geotérmico en el cambio de productividad del sector agrícola mediante un modelo econométrico, se determinó el uso de un modelo de regresión lineal que capture las relaciones entre la productividad agrícola y el uso de energía geotérmica. En este **modelo de regresión lineal** se buscó determinar el grado de relación entre la variable respuesta (productividad), y una única variable explicativa (uso de energía geotérmica). Se verá a continuación si existe relación lineal entre la productividad agrícola y el uso de la energía geotérmica tal y como se ha planteado en el modelo: $y = \beta_0 + \beta_1 (x) + \varepsilon_{it}$

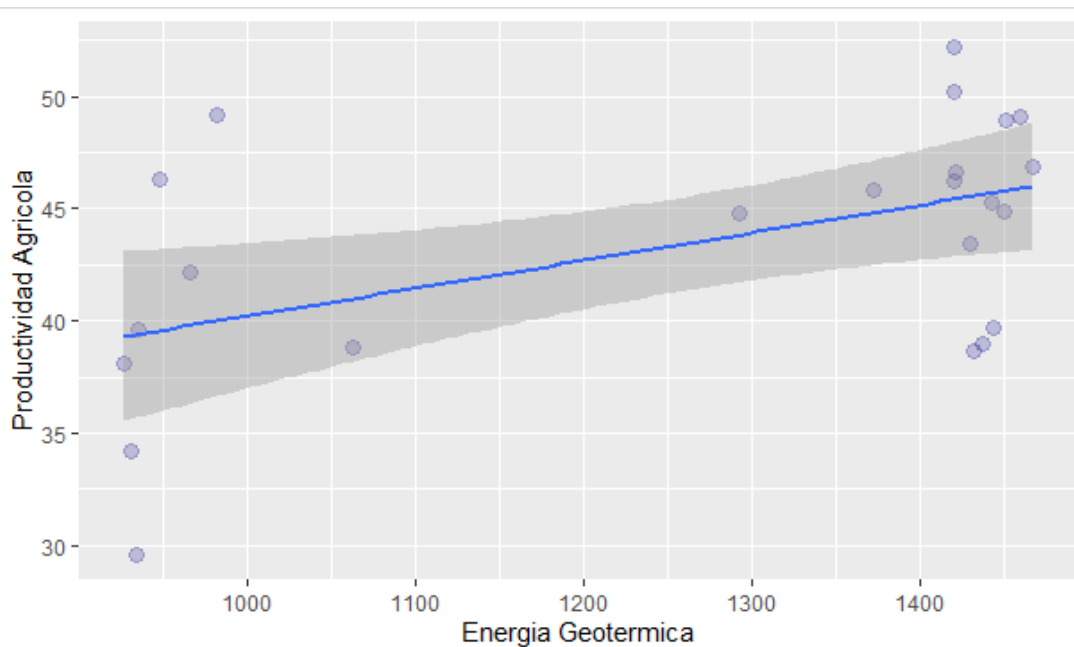
Para poder determinar que las variables planteadas en este modelo de regresión lineal tienen sentido se realizó la elaboración de un diagrama de dispersión por medio del software econométrico RStudio (versión 4.4), con los siguientes resultados (véase la siguiente página). Mediante la técnica de regresión de una variable x sobre una variable y se busca una función que sea una buena aproximación de una nube de puntos $(X_i Y_i)$. El modelo de regresión lineal tiene la siguiente expresión:

$$Y = \alpha + \beta X + \varepsilon$$

Donde:

- α : es la ordenada en el origen (valor que toma Y cuando X vale 0)
- β : es la pendiente de la recta (indica cómo cambia Y al incrementar X en una unidad)
- ε : una variable que incluye un conjunto grande de factores, cada uno de los cuales influye en pequeña magnitud, también conocido como el error.

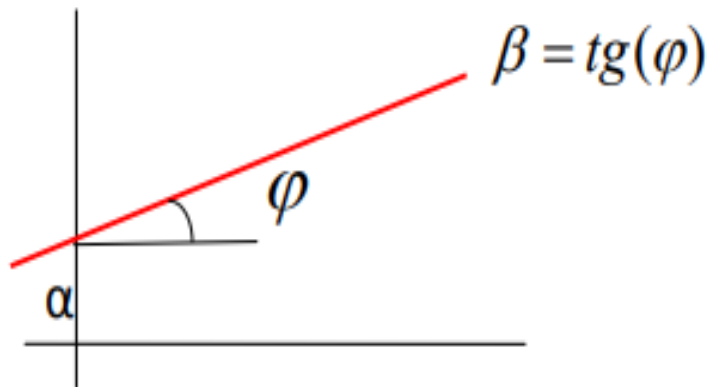
Gráfico 7. Diagrama de dispersión utilizando el método de mínimos cuadrados



Fuente: Elaboración con base a Anuarios de Estadísticas Agropecuarias, Encuesta Nacional Agropecuaria de Propósitos Múltiples (2021-2022), DGEA-MAG (2024). Y Estadísticas Eléctricas, boletines (1999 - 2021), Superintendencia General de Electricidad (SIGET) (2024) en software RStudio (versión 4.3.2)

De manera visual, en el gráfico anterior se representa la dispersión de los datos de la variable dependiente (productividad agrícola de la producción de maíz nacional) y la variable independiente. A continuación, se representa (con una ayuda visual), la forma general del modelo de regresión lineal simple, el cual fue seleccionado como técnica matemática para el manejo de los datos de este estudio:

Ilustración 3. Manera gráfica de Modelo de Regresión Lineal Simple



Fuente: Elaboración en base a conocimientos generales de un modelo de regresión lineal simple.

c) Método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO)

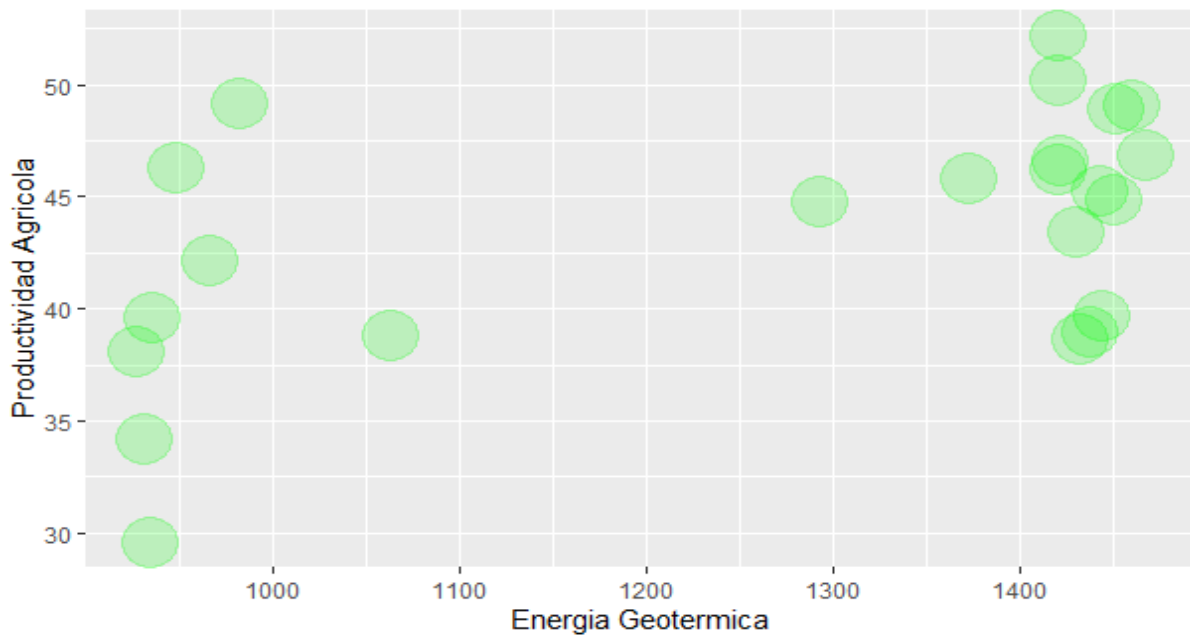
Es importante recordar que en este punto del MCP se busca estimar el cambio en la productividad, es decir determinar cómo el recurso ambiental geotérmico afecta la productividad de la actividad económica en el sector agrícola. Para lograr dicho objetivo este estudio se apoya en el método MCO.

Para hacer una estimación del modelo de regresión lineal se busca la formación de la recta:

$$\hat{Y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}X = a + bX$$

De modo que esa recta sea ajustada a la nube de puntos de las observaciones tomadas en cuenta por las variables exógena y endógena. En base a lo anterior, se ha reproducido el Gráfico 8. Nube de puntos de observaciones de variables $Y \sim X$, que consiste en una ayuda visual en la que es posible ubicar en un eje cartesiano las observaciones de las variables dependiente “Productividad Agrícola” (específicamente de la producción de maíz) e independiente “Energía Geotérmica” (concretamente como insumo en la generación de electricidad), tal y como se muestra a continuación:

Gráfico 8. Nube de puntos de observaciones de variables Y ~ X



Fuente: Elaboración con base a Anuarios de Estadísticas Agropecuarias, Encuesta Nacional Agropecuaria de Propósitos Múltiples (2021-2022), DGEA-MAG (2024). Y Estadísticas Eléctricas, boletines (1999 - 2021), Superintendencia General de Electricidad (SIGET) (2024) en software RStudio (versión 4.3.2)

Para encontrar los parámetros de la recta que se ajusten a la nube de puntos de las observaciones del modelo, se deberá proceder a minimizar la suma de los cuadrados de los errores. En otras palabras, se procederá a minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores reales observados (y_i) y los valores estimados (\hat{y}_i), tal como se muestra a continuación (de forma matemática) en la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Con este método lo que se busca es encontrar los parámetros α y β , para ello se procede con la siguiente ecuación expresada a continuación:

$$a = \bar{y} - b\bar{x}, \quad b = \frac{S_{XY}}{S_X^2},$$

En donde “x” e “y” denotan las medias muestrales de las variables punto X e Y (respectivamente) y, además, S^2x es la varianza muestral de X y S_{xy} es la covarianza muestral de X e Y. Una vez encontrados estos parámetros entonces se procederá a llamar ***coeficiente de regresión denominado con la letra (b)***.

El presente estudio dispone en la herramienta RStudio de un software econométrico y estadístico fiable, donde se procede a correr el modelo de regresión lineal para obtener los coeficientes de regresión por medio del método de mínimos cuadrados ordinarios.

Para llevar a cabo el procedimiento en RStudio se procede primero a cargar las librerías estadísticas especializadas en el sistema (tidyverse, dplyr, ggplot2, readxl, etc), luego se procede a cargar la base de datos ya trabajadas en un archivo tipo csv (véase anexo 14).

Posteriormente, se procede a hacer una especificación de cada una de las variables que forman la nube de puntos *X e Y*, para luego poder establecer un modelo de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) siguiendo la sintaxis del programa econométrico, quedando establecido de la siguiente manera:

Ilustración 4. Código de establecimiento de MCO en RStudio

```
> attach(productividad_agricultura)
> names(productividad_agricultura)
[1] "Productividad Agricola" "Energia Geotermica"
> class(`Productividad Agricola`)
[1] "numeric"
> class(`Energia Geotermica`)
[1] "numeric"
> modelo3<-lm (`Productividad Agricola` ~ `Energia Geotermica`, data = productividad_agricultura, na.action = na.exclude)
> summary(modelo3)
```

Fuente: Elaboración con base a RStudio (versión 4.3.2)

El código anterior muestra en la primera línea la sintaxis para establecer dentro del sistema la base de datos denominada “(Productividad_Agricultura)”, dentro de ella se encuentran establecidas dos variables de tipo numérica denominadas “(Productividad Agrícola)” y “(Energía Geotérmica)”, todo ello como insumo para la creación del modelo al

que se le ha denominado simplemente **modelo3**, cuya sintaxis de código muestra al principio de la estructura las siglas “(lm)”, que nos indica el método que hemos empleado para mínimos cuadrados. Luego del establecimiento del modelo se procedió a correr los datos para obtener los siguientes parámetros:

Ilustración 5. Parámetros por medio de MCO en RStudio

```
R 4.3.2 . ~/
Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    27.867232    5.753736   4.843 8.68e-05 ***
`Energía Geotermica`  0.012350    0.004485   2.753  0.0119 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 4.833 on 21 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.2653,    Adjusted R-squared:  0.2303
F-statistic: 7.582 on 1 and 21 DF,  p-value: 0.01191

> sqrt(0.2653)
[1] 0.5150728
```

Fuente: Elaboración con base a RStudio (versión 4.3.2)

La ilustración anterior muestra los parámetros obtenidos por medio del MCO utilizando RStudio para una base de datos de dos variables aleatorias (Productividad Agrícola y Energía Geotérmica), que por medio del modelo se puede establecer el grado de relación que existe entre dichas variables. En otras palabras, en qué medida Y se puede explicar por X, o lo que es igual, en qué medida basado en estos datos se puede estimar la medida en que el uso de la energía geotérmica contribuye a la productividad agrícola.

Uno de los parámetros principales que se obtiene es el R - squared, el cual expresa que la variable independiente explica la variable dependiente (que para este caso es: 0.2653), siendo un valor bajo para explicar tal variable en su totalidad. Si el valor fuera 0.80 hacia arriba el modelo explicaría con una sola variable la relación entre ellas, pero en este caso de estudio es una cuestión ya prevista, dado que se es sabido que la productividad agrícola depende de muchos factores (siendo la energía uno más de ellos); sin embargo, nos interesa conocer el impacto que esa variable tiene, es decir el valor marginal de la variable en la productividad.

Uno de los valores que también es de mucho interés conocer es el coeficiente de correlación de Pearson, ya que indicaría que el estudio se fundamenta en dos variables que muestran un grado de correlación positiva. El coeficiente de correlación de Pearson oscila entre -1 y +1, leyéndose de la siguiente manera:

Tabla 2. Parámetros de lectura de coeficiente de correlación de Pearson

-1 < 0	Correlación negativa, es decir que las dos variables están asociadas, pero en sentido inverso. Cuanto más se acerca a -1, mayor es la relación de esa fuerza invertida (cuando el valor en una variable sea muy alto, en la otra variable será muy bajo).
0 > +1	Un valor mayor que 0 indica una correlación positiva. Las variables están asociadas en sentido directo. Cuanto más se acerca a +1, más alta es su asociación.
0	Una correlación de 0 o próxima a 0 indicaría que no hay relación entre las dos variables.

Fuente: Tomado del blog Correlación de Pearson. Consultoría Estratégica de Invest. de Mercados (2024).

RStudio por medio de sus funciones avanzadas permite obtener el coeficiente de correlación de Pearson para conocer si las variables en estudio tienen relación, o simplemente no tienen relación alguna entre ellas. Para este caso poder conocer dicho coeficiente se aplicó la función en RStudio (sqrt) al parámetro obtenido R - squared del MCO, obteniendo así un valor del coeficiente de correlación de Pearson de: 0.5150 que basado en la tabla de lectura del coeficiente nos ubica entre $0 > +1$, lo que indica que las variables están asociadas en sentido directo, es decir existe una correlación positiva entre los datos de las variables (Productividad Agrícola y Energía Geotérmica). Lo anterior, resulta de mucha importancia para obtener toda la información referente a la correlación de las variables con el fin de mostrar el modelo como válido antes de proceder con la ubicación de los parámetros del modelo. Una vez teniendo los parámetros del modelo a través de RStudio vistos en la Ilustración 5 se procede a establecer el

modelo siguiente:

Modelo de regresión lineal utilizando MCO

$$Y = \alpha + \beta X + \varepsilon$$

$$Y = 27.867 + 0.012350 (X) + 4.833$$

$$\text{Productividad Agrícola} = 27.867 + 0.012350 (\text{Uso de Energía Geotérmica}) + 4.833$$

El coeficiente de regresión β nos permite obtener información sobre el comportamiento de la variable “Y” frente al cambio en la variable “X”. Teniendo en cuenta los parámetros de lectura del coeficiente de regresión mencionado anteriormente, se confirma nuevamente que el $\beta > 0$ lo que demuestra que el coeficiente de correlación de Pearson es válido, ya que nuevamente indica que un cambio positivo en la variable exógena X provocará un aumento positivo en la variable endógena Y (léase la siguiente tabla):

Tabla 3. Parámetros de lectura de coeficiente de regresión

$\beta = 0$	Para cualquier valor de X la variable Y es constante (es decir, no se mostrará cambio en Y ante variaciones en X)
$\beta > 0$	Al aumentar el valor de X también aumenta el valor de Y
$\beta < 0$	Al aumentar el valor de X el valor de Y disminuye

Fuente: Elaboración en base a Econometría de Gujarati D., (2009)

Sin embargo, en este apartado del presente estudio es de interés conocer ¿en qué medida el cambio en el uso de la energía geotérmica afecta la productividad del sistema agrícola? Basado en los resultados y valores de los parámetros obtenidos por medio del modelo de regresión la lectura es la siguiente:

“El modelo de regresión lineal muestra una correlación positiva entre las variables; una relación lineal directa donde si aumenta X también aumenta Y. El aumento marginal corresponde al grado donde por cada unidad adicional de X que se suma al sistema, Y aumentará en una proporción de +0.012350 unidades”.

Tomando en cuenta el resultado obtenido se puede concluir que se ha estimado el cambio marginal en la productividad, con lo cual se completa el primer paso de la ecuación del Método de Cambio en la Productividad.

d) Medir la cantidad del cambio

Para poder realizar el segundo paso del MCP se debe cuantificar el cambio en los niveles de productividad o producción (por ejemplo, QQ por manzana producida), que se atribuyen directamente al recurso ambiental geotérmico por medio del uso de la energía geotérmica en los procesos de producción agrícola.

Para realizar la medición del cambio es importante recordar siempre las magnitudes en que fueron calculados los datos dentro del modelo de regresión lineal por medio de los cuales se obtuvieron los parámetros anteriores. En ese sentido, la magnitud en que se ha medido la energía geotérmica en su producción anual es de GW/h, lo que se obtuvo de fuentes secundarias de base de datos estadísticas de la SIGET, producción de energía en el período (1999 - 2021). Así mismo, se determinó como magnitud de la productividad del sector agrícola la producción (quintales por manzana) limitada a un producto agrícola como el maíz con precio de mercado establecido y determinado por estadísticos confiables del Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Es importante recordar que se está estimando el grado de respuesta de la variable dependiente Y ante el cambio en una única variable independiente X, por lo cual las magnitudes de los datos pueden ser distintas sin afectar el modelo de regresión lineal. La regresión lineal

se basa en la idea de que hay una relación lineal entre las variables. Si esta relación existe (como ya fue demostrado) la magnitud de las variables no afectará la validez del modelo.

La regresión lineal es **invariante ante transformaciones lineales**. Esto significa que, si escalamos, transformamos, o normalizamos las variables, la relación subyacente sigue siendo la misma. La normalización se debe aplicar en casos donde las variables explicativas fuesen más de una, ya que la magnitud distinta entre ellas puede afectar la lectura correcta de los parámetros de correlación (caso que no aplica para la presente investigación).

Ecuación del Valor Económico

$$\underline{\text{Valor Económico} = \sum(\Delta\text{Productividad}) \times \text{Precio}}$$

Todo lo referente a la aplicación del modelo de regresión se encuentra inmerso en el primer factor de la ecuación (variación de la productividad). Para conocer dicha variación se hace necesario extrapolar la producción con el uso y sin el uso del recurso geotérmico, tomando mayor validez al tener la estimación del cambio marginal por unidad extra de insumo (y su efecto) en la producción haciendo uso del modelo de regresión lineal.

Datos Energéticos:

- Capacidad instalada (potencial total) de producción de energía en centrales geotérmicas de Berlín y Ahuachapán: 204.4 GWh para el año 2021.

Modelo de regresión lineal utilizando MCO

$$Y = \alpha + \beta X + \varepsilon$$

$$Y = 27.867 + 0.012350 (X) + 4.833$$

$$\text{Productividad Agrícola} = 27.867 + 0.012350 (204.4) + 4.833$$

$$\text{Productividad Agrícola (QQ /Mz)} = 35.224$$

Con base en los parámetros del modelo de regresión lineal, y teniendo en cuenta los datos de la producción de energía geotérmica, se ha podido estimar la cantidad del cambio en términos de productividad, dando como resultado que el sistema de energía geotérmico, que para 2022 proporciona el 22% de la matriz energética según CEL, en términos de productividad agrícola produciría 35.22 QQ / Mz. Para el año 2021, la superficie en manzanas para cultivo de maíz era de 376,229 manzanas (véase anexo 15), con lo cual si la productividad de cultivo logra una producción de 35.22 QQ/Mz, entonces se estaría logrando una estimación de producción total de **13,252,418.21 QQ** de maíz al año utilizando dicha fuente de energía geotérmica.

e) Determinar el precio de mercado.

El tercer paso del Método de Cambio en la Productividad consiste en obtener el precio de mercado actual del producto afectado por el cambio en el recurso. Esto nos lleva al segundo lado de la ecuación:

Ecuación del Valor Económico

$$\underline{\text{Valor Económico} = \sum(\Delta\text{Productividad}) \times \text{Precio}}$$

Sin duda, alimentos básicos como el maíz (que son parte de la dieta promedio salvadoreña), al formar parte esencial de la canasta básica son constantemente monitoreados a nivel de precios por parte de la Defensoría del Consumidor, por lo que existen suficientes datos estadísticos de fuentes secundarias confiables que muestran los precios al consumidor. El precio promedio del quintal de maíz para el año 2021 fue de **\$16.90** según el Anuario de Estadísticas Agropecuarias (2021 - 2022)³¹.

³¹ Para más información, por favor consúltese el anexo 16.

f) Calcular el Valor Económico

El cuarto paso del Método de Cambio en la Productividad se logra por medio de la multiplicación del cambio en la productividad por el precio de mercado del producto, para obtener el valor económico atribuible al recurso ambiental geotérmico.

$$\text{Valor Económico} = \text{Variación de Productividad} \times \text{Precio}$$

$$\text{VE} = 13,252,418.21 \times 16.90$$

$$\text{VE} = 223,965,867.81 \text{ USD}$$

El presente estudio, basado en el MCP, construido a partir de un modelo de regresión lineal y el método de mínimos cuadrados ordinarios, realizó en primera instancia la estimación de la correlación positiva entre ambas variables, para luego estimar la variación marginal positiva de dicha correlación, y con ello, guiado por los precios de mercado de fuentes secundarias oficiales, llevó a cabo la estimación del valor económico de un recurso ambiental estratégico como la energía geotérmica, basado en los precios de mercado de un producto del sector agrícola como el maíz con un precio establecido para el año 2021.

2.3. Diagnóstico - Sistema de Valoración como Base para el Minado de Bitcoin

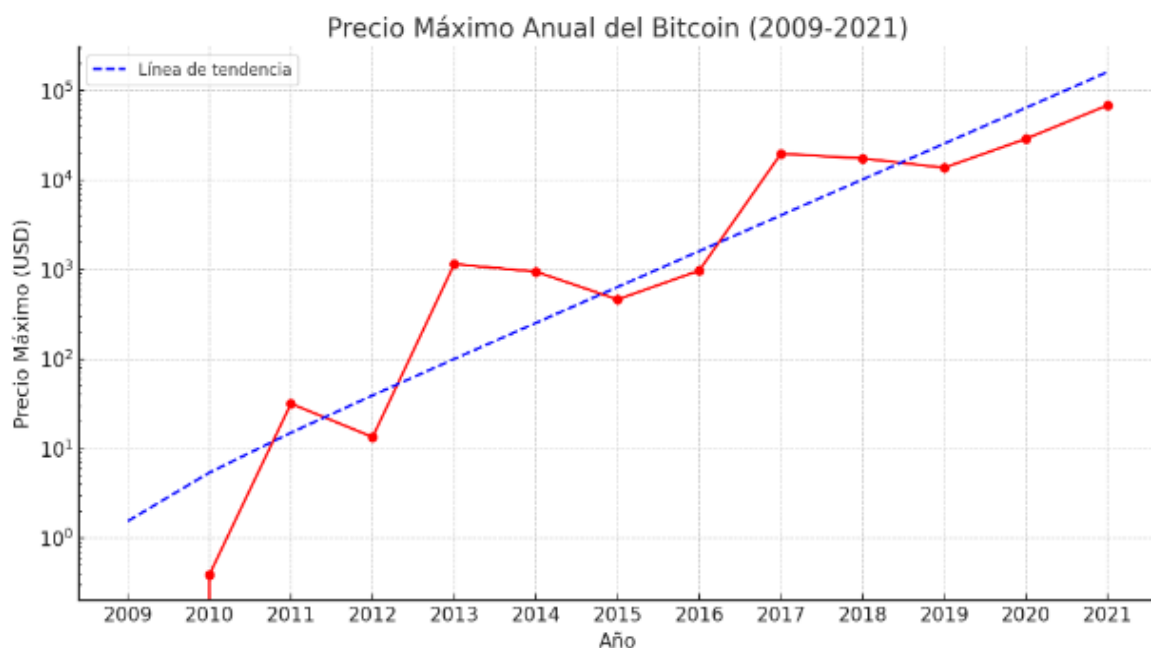
En enero del 2009, Nakamoto minó el primer bloque de la cadena de bitcoin (conocido como el “bloque génesis”), dando inicio a la red homónima que ya para el año 2021 habría alcanzado a minar un poco más de 17 millones de BTC³², suponiendo un poco más del 80% del total de 21 millones (posibles de minar). La popularidad de bitcoin comenzó a crecer, atrayendo la atención de entusiastas tecnológicos como de especuladores. Esto llevó al aumento significativo de su precio, aunque acompañado de una volatilidad considerable³³.

³² Véase anexo 17.

³³ Véase anexo 18.

Para ver la evolución de la importancia del bitcoin se elaboró una tabla donde se aprecia la dinámica de los precios de cada año desde el 2009 hasta el 2021 con sus fechas específicas³⁴. En ella, se observa un crecimiento exponencial y saltos importantes en cada evento halving (más adelante se detallará qué es un evento halving). Por lo tanto, es evidente que bitcoin ha permanecido como la criptomoneda más prominente, dando origen a una industria de criptomonedas en expansión, las cuales siguen el modelo iniciado por dicha criptomoneda.

Gráfico 9. Precios máximos del bitcoin (2009 - 2021)



Fuente: Elaboración con base en datos de CoinMarketCap (2024).

En el gráfico anterior, se puede observar el precio máximo anual del bitcoin desde 2009 hasta el 2021, junto con una línea de tendencia. La línea de tendencia se calculó utilizando un ajuste polinómico en escala logarítmica para reflejar mejor la tendencia exponencial de los precios a lo largo de los años, mostrándose en una línea punteada azul. Puede apreciarse en esta una tendencia marcadamente ascendente.

³⁴ Véase anexo 19.

2.3.1. Determinación de la Producción Máxima de Bitcoin a Escala Global.

Para determinar la producción máxima de bitcoin por año desde 2009 hasta 2021, se debía considerar dos factores principales a escala mundial, y el tercero a escala nacional:

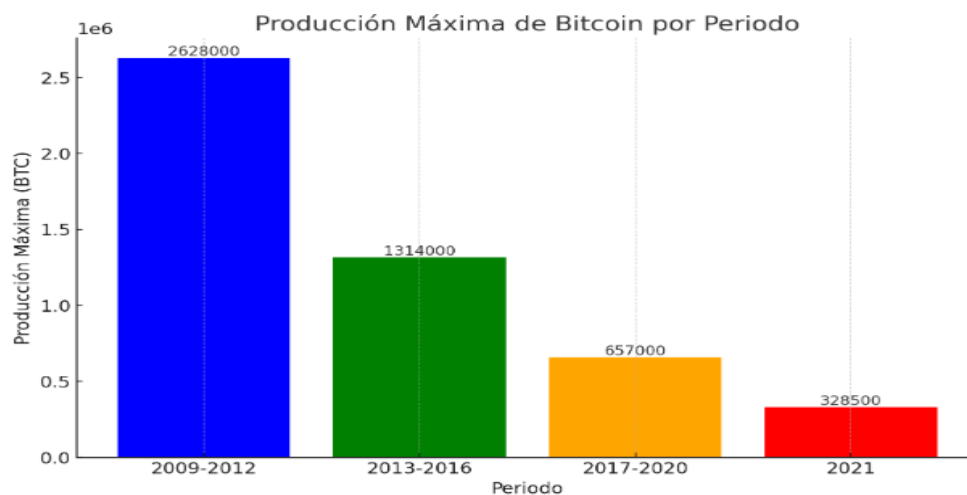
- La recompensa por bloque
- Los eventos de halving
- La ausencia de una serie de datos históricos de minado de BTC en ESA

La “recompensa por bloque” hace referencia al número de BTC que en ese momento se está adquiriendo por cadena de bloque minado (comenzó siendo 50 BTC). En cambio, un “halving” es un evento programado que reduce a la mitad la recompensa por bloque ocurriendo cada cuatro años (aprox.). A continuación, se listará la producción máxima de BTC por año teniendo en cuenta ambos eventos:

1. 2009 - 2012: La recompensa por bloque era de 50 BTC. Con aproximadamente 52,560 bloques al año (144 bloques por día), esto da un máximo de 2,268,000 BTC por año a nivel mundial.
2. 2013 - 2016: Después del primer halving en noviembre de 2012, la recompensa por bloque se redujo a 25 BTC. Esto da un máximo de 1,314,000 BTC por año.
3. 2017 - 2020: El segundo halving ocurrió en julio de 2016, reduciendo la recompensa a 12.5 BTC por bloque. Esto resulta en un máximo de 657,000 BTC por año.
4. 2021: El tercer halving ocurrió en mayo del 2020, estableciendo la recompensa en 6.25 BTC por bloque. Así para el 2021, el máximo sería aproximadamente 328,500 BTC.
5. 2024: Siguiendo una tendencia lineal basado en los cálculos anteriores, se espera que para el momento del presente estudio se hayan minado 18,268,000 BTC (87%) del total de BTC posibles de minar, quedando pendiente el cuarto halving, que se considera hará aún más complicado y demandante de energía el proceso de minado.

Los cálculos anteriores sólo se pueden realizar de manera teórica, asumiendo la generación constante de bloques a la tasa esperada de uno cada diez minutos. Las variaciones en la tasa real de generación de bloques pueden causar pequeñas variaciones en estos totales anuales, los cuales se ven expresados gráficamente de la siguiente manera:

Gráfica 10. Producción máxima de BTC por periodo halving



Fuente: Elaboración con base a datos de CoinMarketCap, tasa esperada de generación de bloques (2024).

Teniendo como base los datos y eventos expuestos anteriormente, es necesario tomar en cuenta la tercera cuestión antes citada. No es posible elaborar una base de datos con las variables “producción de BTC” y “energía geotérmica”, para correr nuevamente con el procedimiento de elaboración del modelo de regresión lineal por mínimos cuadrados ordinarios (y obtener los parámetros en que una variable explica a la otra), debido al evidente hecho que en El Salvador no ha habido ninguna granja minera en operación para dicha serie de tiempo; fue hasta el 05 de octubre de 2023 que la primera granja de BTC fue inaugurada, llamada “Lava pool”, la cual será administrada por la compañía Volcano Energy.

Pese a este inconveniente, si es posible (por medio de métodos más simples), de efectuar una estimación de la medida en cómo la energía geotérmica puede traducirse en minado de BTC, con el fin de obtener un resultado que sirva de punto de comparación con la

estimación del VE ya hecho previamente (para el caso de la productividad del recurso geotérmico en el sector agropecuario, específicamente en la producción de maíz), con el fin de poder evaluar por medio de un contraste simple la conveniencia o no del uso de los recursos geotérmicos en minado de bitcoin, en lugar de otros usos más convencionales, como el ya mencionado.

- **Supuestos de la estimación del impacto del uso de la energía geotérmica en el minado de BTC:**

- Al ser en su naturaleza descentralizado el proceso de producción (minado) de bitcoin, no se puede afirmar (de forma tajante) que un porcentaje de este se produce en un territorio determinado, sólo de forma aproximada.
- Dado que en el caso de El Salvador no ha habido ningún proceso de minado de BTC a priori, se pretenderá hipotéticamente que el 100% de todo el “*output*” o salida del recurso geotérmico (de las dos plantas nacionales de geotermia) se destinan para el minado de bitcoin a escala nacional (véase anexo 20).
- Se entiende que los requerimientos de electricidad de las máquinas minadoras de BTC son independientes per se, al origen o la fuente de la energía eléctrica que satisface su demanda (sea esta hidráulica, geotérmica, etc), por lo que se asumirá que su nivel de eficiencia será constante (*ceteris paribus*).
- Dado que no existe serie histórica de datos (y que las inversiones en ampliación de infraestructura energética, generalmente se completan en el mediano plazo, en promedio de 3 a 5 años), se asume que El Salvador minará a un nivel constante de BTC en el periodo de interés (años 2021 y 2023), bajo la asunción de -*ceteris paribus*- centrales geotérmicas a igual capacidad instalada de producción geotérmica, sin variaciones en su eficiencia tecnológica, etc.

2.3.2. Cálculo del Minado de BTC por “Output” de Energía Geotérmica en ESA

Dada las limitaciones de datos históricos mencionados, se realizará la estimación basados en la cantidad de energía que se necesita para minar una unidad de BTC al nivel de recompensa actual (6.25 BTC / bloque), nivel actual de dificultad de la red bitcoin y niveles de hardware para minería y el costo de la electricidad.

Una de las fuentes más citadas y respetadas para estimaciones sobre el consumo de energía en la minería de bitcoin es el “Índice de Consumo de Electricidad de Bitcoin” de Cambridge (Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index, CBECI). Este índice desarrollado por el “Centro de Finanzas Alternativas de la Universidad de Cambridge”, proporciona una estimación fiable y en tiempo real del consumo total de electricidad de la red bitcoin³⁵.

El CBECI no solo ofrece una estimación del consumo actual, sino también incluye un mínimo y un máximo teóricos, lo que ofrece una idea de los posibles rangos de consumo. Además, el índice proporciona un contexto para las cifras, ya que es capaz de compararlas con el consumo de electricidad de países enteros y otros indicadores.

El índice CBECI ofrece una base sólida y científicamente fundamentada para entender el consumo de energía asociado con la minería de bitcoin. Con la fuente anterior se han realizado estudios y estimaciones donde para el año 2021 sugerían que el promedio de energía necesaria para minar un solo bitcoin podría estar entre 60 y 130 megavatios hora (MWh). Para efectos de comparación, en El Salvador durante el 2021 el consumo de energía anual por hogar fue de 1,060.80 kWh (Datosmacro.com, 2024), es decir 88.4 kWh de consumo de energía eléctrica promedio mensual, con lo cual se estima que la energía necesaria para minar una unidad de BTC podría igual proveer de electricidad a 1,470 hogares salvadoreños por mes.

³⁵ Para más información visítense el siguiente enlace: [Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index \(CBECI\)](#)

La minería de bitcoin se basa en un proceso llamado “prueba de trabajo”, que requiere una gran cantidad de poder de cómputo. A medida que más mineros se unen a la red y/o la eficiencia de los equipos de minería mejora, la dificultad general de la minería también aumenta, lo que lleva a un consumo mayor de energía. Tomando en cuenta las estimaciones anteriores de estudios previos basados en el CBECI de la Universidad de Cambridge, se realizó la estimación de la cantidad de bitcoin que El Salvador estaría en capacidad de minar, teniendo presente el segundo supuesto establecido con anterioridad donde se asume que el 100% de la energía geotérmica producida (204.4 MW) se destinaría a la minería de bitcoin.

Magnitudes Energéticas Involucradas:

- Producción de energía basada en geotermia en El Salvador: 204.4 GWh
- Estimación de energía necesaria para minar un bitcoin: 60 - 130 MWh
- 1 gigavatio (GW) es igual a 1000 megavatios (MW), y estos a 1000 kilovatios (kW)
- 204.4 GWh ~ 204,400 MWh

Tabla 4. Capacidad de minado de El Salvador al nivel actual de generación de energía geotérmica.

PAIS	ENERGIA GEOTERMICA (MWh) CAPACIDAD INSTALADA	INTERVALO ENERGIA (MWh) NECESARIA PRODUCIR 1 BTC	PRODUCCION ESPERADA BTC
EL SALVADOR	204,400	60	3,406.67
EL SALVADOR	204,400	130	1,572.31

Fuente: Elaboración con base a estimaciones de CBECI para el intervalo de energía necesaria para producir un bitcoin, y de SIGET para la capacidad instalada de generación de energía geotérmica en El Salvador (2024).

Los datos de la tabla anterior muestran la producción esperada o minado que El Salvador tendría actualmente, bajo el supuesto de utilizar el total de capacidad instalada de las dos centrales geotérmicas de Berlín y Ahuachapán. Se realizó el cálculo para ambos intervalos estimados por el CBECI, ya que muestran dos escenarios posibles de consumo de energía que

se pueden tomar en cuenta. Cuando el Index estimó que se necesitan 60 MWh para producir 1 BTC, El Salvador podría minar 3,406.67 BTC en un año al cien por cien de la capacidad total de dos plantas geotérmicas. En el segundo escenario, el Index mostró el intervalo superior donde se requiere de una mayor cantidad de energía (130 MWh) para minar 1 BTC en El Salvador, pudiendo minar 1,572.31 BTC en un año al cien por cien de la capacidad instalada.

A continuación, se detalla el valor de la energía geotérmica en términos de bitcoin utilizando precios de mercado para 2021 y 2023:

Magnitudes de precios involucradas:

- Producción esperada (intervalo 60 MWh) = 3,406.67 BTC
- Producción esperada (intervalo 130 MWh) = 1,572.31 BTC
- Precio máximo BTC (2021) = \$68,789.63
- Precio máximo BTC (2023) = \$39,689.80

Tabla 5. Valor estimado de la Energía Geotérmica en términos de bitcoin 2021

PAIS	ENERGIA GEOTERMICA (MWh) CAPACIDAD INSTALADA	INTERVALO ENERGIA (MWh) NECESARIA PRODUCIR 1 BTC (AÑO 2021)	PRODUCCION ESPERADA BTC	PRECIO MAXIMO USD BTC 2021	VALOR GENERADO AL MINAR BITCOIN / AÑO
EL SALVADOR	204,400	60	3,406.67	\$68,789.63	\$ 234,343,339.53
	204,400	130	1,572.31	\$68,789.63	\$ 108,158,464.40

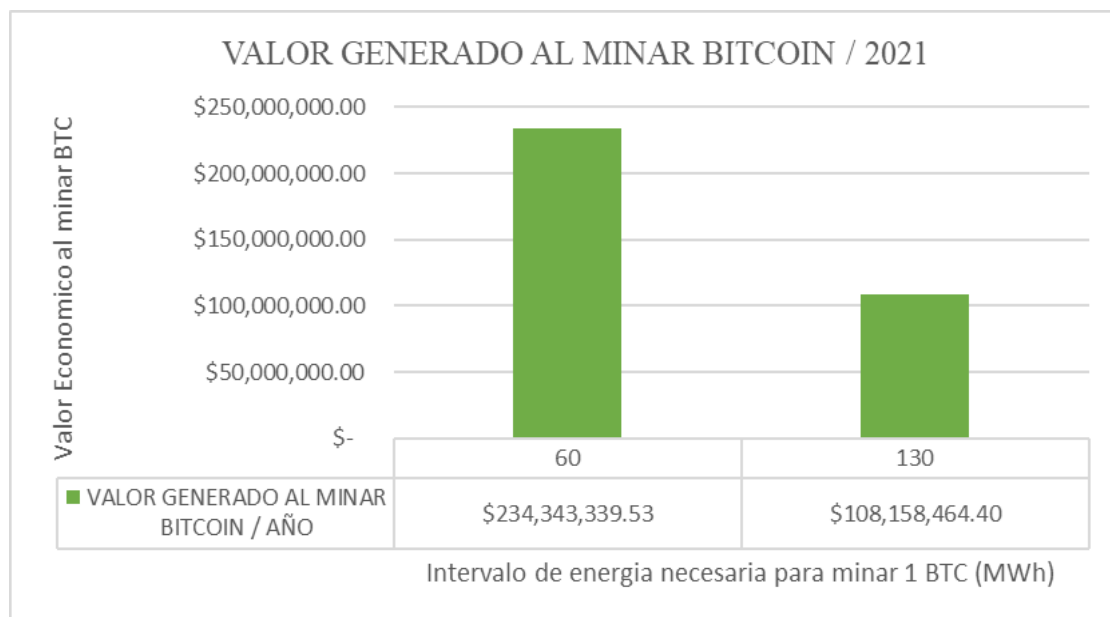
Fuente: Elaboración con base a estimaciones de CBECI para el intervalo de energía necesaria para producir un bitcoin (2024); de SIGET para la capacidad instalada de generación de energía geotérmica en El Salvador (2024); y CoinMarketCap (2024) para los precios máximos de BTC.

Tomando en cuenta el dato del precio de mercado del bitcoin para el año 2021, es posible completar el cálculo a comparar con respecto al VE que puede obtenerse si se emplea la totalidad de la energía geotérmica nacional de 204,400 MWh (para producir energía eléctrica en favor de minado de BTC). Teniendo en cuenta lo anterior, para el intervalo donde el índice de CBECI estimó que en 2021 para producir una unidad de BTC eran necesarios 60 MWh, se

calcula una producción estimada de 3,406.67 BTC, siendo que para ese mismo año el precio de mercado máximo establecido para una unidad de BTC era de \$68,789.63, llegando así a generar bajo todos estos supuestos de minado de BTC con un empleo total de toda la capacidad instalada y precio máximo de mercado un **VE = \$234,343,339.53**.

Teniendo en cuenta la misma lógica, sólo que en esta ocasión empleando los parámetros faltantes del intervalo para este 2do escenario (donde el índice de CBECI estimó para 2021 que se necesita más energía para producir una unidad de BTC, ergo 130 MWh), se obtendría una producción estimada de 1,572.31 BTC, y con ello al precio máximo de mercado \$68,789.63 se estima un **VE = \$108,158,464.40**

Gráfico 11. Valor de Energía Geotérmica en término de BTC (2021)



Fuente: Elaboración con base a estimaciones CBECI para los intervalos de energía necesarios para producir un BTC (2024); de SIGET para la capacidad instalada de energía geotérmica en ESA (2024); y CoinMarketCap (2024) para los precios máximos de BTC. Nota: los cálculos fueron hechos sin redondeo de decimales.

Para realizar la estimación del valor económico de la energía geotérmica en términos de producción o minado de BTC para el año presente de este estudio (2024), se realizó el mismo procedimiento cambiando únicamente la variable precio del bitcoin al valor actual (siendo de

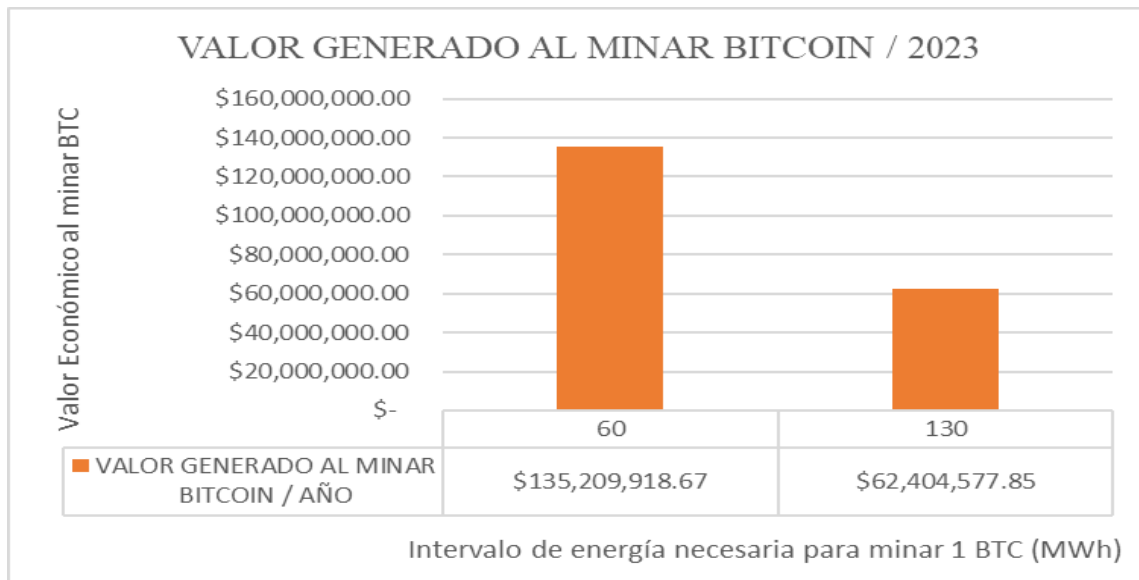
\$39,689.80 para el 02-12-23) y, ante la ausencia de datos de minado, se mantiene el supuesto que los intervalos de energía necesarios para producir 1 BTC siguen siendo los mismos (60 - 130 MWh). A continuación, la Tabla 6 y el Gráfico 12 ilustran a detalle para dicho año los escenarios posibles, con sus respectivas explicaciones:

Tabla 6. Valor estimado de la Energía Geotérmica en términos de bitcoin 2023

PAIS	ENERGIA GEOTERMICA (MWh) CAPACIDAD INSTALADA	INTERVALO ENERGIA (MWh) NECESARIA PRODUCIR 1 BTC (AÑO 2021)	PRODUCCION ESPERADA BTC	PRECIO MAXIMO USD BTC 2021	VALOR GENERADO AL MINAR BITCOIN / AÑO	PRECIO ACTUAL USD BTC 2023	VALOR GENERADO AL MINAR BITCOIN / AÑO
EL SALVADOR	204,400	60	3,406.67	\$68,789.63	\$ 234,343,339.53	\$39,689.80	\$ 135,209,918.67
	204,400	130	1,572.31	\$68,789.63	\$ 108,158,464.40	\$39,689.80	\$ 62,404,577.85

Fuente: Elaboración con base a estimaciones CBECI para el intervalo de energía necesaria para producir un bitcoin (2024); de SIGET para la capacidad instalada de generación de energía geotérmica en El Salvador (2024); y CoinMarketCap (2024) para los precios máximos de BTC.

Gráfico 12. Valor de Energía Geotérmica en término de BTC (2023)



Fuente: Elaboración con base a estimaciones CBECI para el intervalo de energía necesaria para producir un bitcoin (2024); de SIGET para la capacidad instalada de generación de energía geotérmica en El Salvador (2024); y CoinMarketCap (2024) para los precios máximos de BTC.

Teniendo en cuenta lo anterior, para el intervalo donde el índice de CBECI estimó que en 2021 para producir una unidad de BTC eran necesarios 60 MWh, se estima una producción de 3,406.67 BTC que, para diciembre del 2023 al precio de mercado establecido para una unidad de BTC de \$39,689.80, se generaría bajo tales supuestos un **VE = \$135,209,918.67**.

Así mismo, y manteniendo todos los parámetros anteriores excepto el intervalo superior que el índice de CBECI estimó como el escenario en el cual se necesita más energía para producir una unidad de BTC (130 MWh), teniendo una producción estimada de 1,572.31 BTC y a la vez con un precio máximo de mercado de \$39,689.80, es posible calcular una total de **VE = \$62,404,577.85**.

2.3.3. Alternativas de Uso de la Energía Geotérmica (Prod. de Maíz vs. BTC)

El Salvador es un país cuya economía dispone de la peculiaridad de contar con fuentes de energía geotérmica, un importante recurso renovable denominado como “oro blanco” (ya que es una fuente de energía limpia que proporciona el 22% de la matriz energética para el año 2022 según la SIGET), lo que reduce la dependencia energética nacional.

En base a lo anterior, y pese a las múltiples bondades de este recurso ambiental que posiblemente las limitaciones de este estudio no alcanzaron a cubrir, se revela esencial el poder determinar y contar con estadísticos que ayuden a los tomadores de decisiones públicas a elegir el más óptimo uso posible (en un sentido económico) de este tipo de recursos, para abonar y redundar en el bienestar nacional.

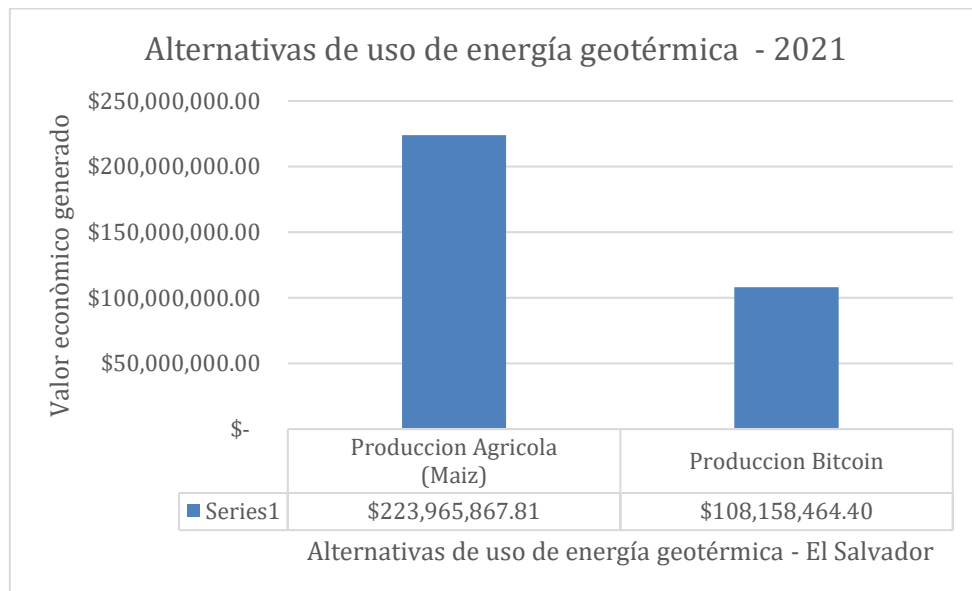
Por todo lo anterior, siendo pues a partir de esta premisa que se constituyó un sistema con el cual realizar una valoración económica de dicho recurso (como insumo de la generación de energía eléctrica), con el fin de poder determinar el uso más conveniente para el susodicho recurso ambiental geotérmico, mostrando en la Tabla 7 y el Gráfico 13 los respectivos resultados pertinentes a esta cuestión.

Tabla 7. Alternativas de uso del total de capacidad instalada de la Energía Geotérmica en El Salvador (2021)

ALTERNATIVAS DE USO GEOTÉRMICO EN ESTUDIO	VALOR ECONÓMICO USD PRECIOS DE MERCADO 2021
Producción Agrícola (Maíz)	\$223,965,867.81
Producción Bitcoin	\$108,158,464.40

Fuente: Elaborado en base a datos de CBECI (Cambridge) (2024); SIGET (2024); y CoinMarketCap (2024).

Gráfico 13. Alternativas de uso de la energía geotérmica en El Salvador (Producción Agrícola - Producción Bitcoin) - 2021³⁶



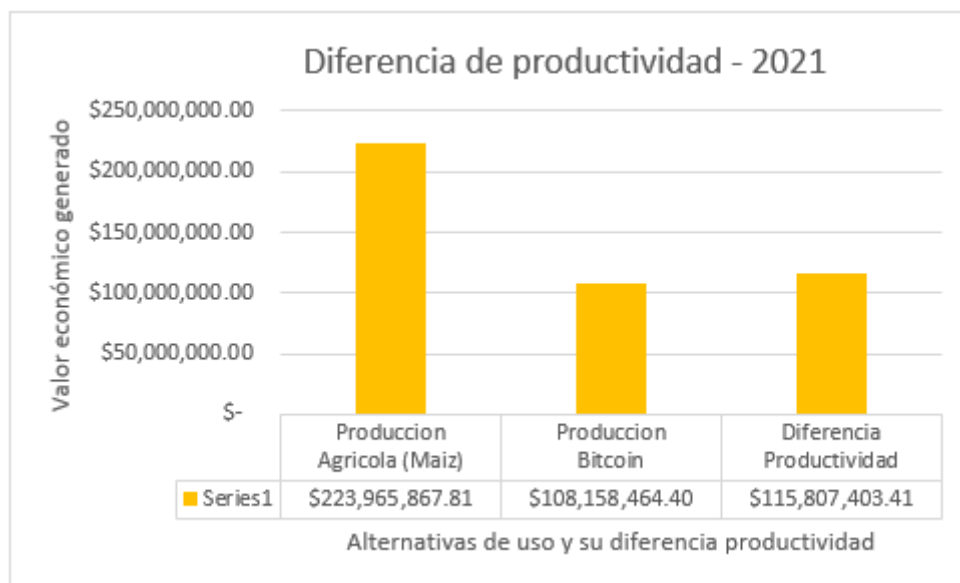
Fuente: Elaborado en base a datos de CBECI (Cambridge) (2024); SIGET (2024); y CoinMarketCap (2024).

Bajo el contexto de la política monetaria actual, de incursionar en el mercado de las criptomonedas como el primer país en el mundo que avala como moneda de curso legal a una criptomoneda como el bitcoin, en el cual se elaboran planes de utilizar los recursos naturales

³⁶ Por principio precautorio, se decidió comparar el VE de la producción de maíz con el VE de BTC sólo con el intervalo de consumo más alto (de 130 MWh), en el entendido que las políticas públicas deben diseñarse tomando en cuenta los escenarios más pesimistas, previendo así potenciales consecuencias negativas inesperadas. Se empleó el precio de BTC del año 2021 (y no del 2023 que plantea un escenario más desfavorable), debido a que la serie de datos de la producción de maíz termina en ese mismo año en el que BTC es legalizado en El Salvador.

disponibles como la energía geotérmica para el minado de dicha moneda digital, es bastante pertinente esfuerzos realizados como los del presente estudio, que brinden aportes importante con los cuales esclarecer a la luz de herramientas científicas como las que la ciencia económica brinda a disposición, cuáles serían las asignaciones que permitan alcanzar el nivel de productividad más óptimo que se pueda obtener del recurso geotérmico, de acuerdo al uso alternativo que se asigne para el beneficio nacional. De ahí que, si bien es importante dejar en claro que bitcoin representa una alternativa que abre posibilidades de uso interesantes, es necesario considerar los usos que signifiquen la asignación más óptima, generando mayor valor económico para el país, tal y como se muestra a continuación en la Gráfica 14.

Gráfico 14. Diferencia entre alternativas de uso de Energía Geotérmica en El Salvador (Producción Agrícola - Producción Bitcoin) - 2021



Fuente: Elaborado en base a datos de CBECI (Cambridge) (2024); SIGET (2024); y CoinMarketCap (2024).

Basado en los datos obtenidos en el presente trabajo, se muestra que la alternativa de uso más óptima en términos de un mayor retorno de valor económico, si se compara al bitcoin con uno de los sectores más tradicionales y estratégicos de la economía como es el sector agrícola (más específicamente la producción de maíz a precios de mercado), se obtiene un rendimiento mayor en este que con el primero, con una diferencia considerable en VE del orden

de \$115,807,403.41, que se dejarían de percibir si se destina el total de la capacidad instalada de energía geotérmica al rubro de bitcoin, en comparación a que si dicha energía se destinara a la esfera de la productiva, de la que la producción de maíz obtiene su insumo energético. Vale la pena señalar que el alcance del presente trabajo se limita al estudio del comportamiento de un par de variables, siendo posible que el bitcoin tenga más bondades que los retornos detallados en función de su valor económico (que derivan directamente de su cotización de mercado, o indirectamente por cuestiones conexas como los ingresos por turismo, etc.) pero que, al no ser viable abordarlas en esta simplificación de la realidad que constituye este simple pero consistente sistema de valoración económica, quedan fuera del alcance del presente estudio poder ahondar en las mismas.

III. CONSIDERACIONES FINALES DE LA PROBLEMÁTICA EN CUESTIÓN

3.1. Conclusiones

El trabajo de investigación: “Sistema de Valoración Económica del Recurso Ambiental Geotérmico como Base para el Minado de Bitcoin en El Salvador”, abordó la cuestión de establecer un medio por el cual determinar desde la ciencia económica el valor de un recurso ambiental que, pese a carecer por sí mismo de un mercado que establezca su precio, en virtud del servicio que provee a la economía salvadoreña como generador de electricidad por energía geotérmica posee un valor indirecto, el cual se desea emplear por parte del tomador de decisión pública (GOES) en un uso alternativo como es el minado de la criptomoneda bitcoin; por lo cual queda patente la necesidad de disponer de una vía científica para establecer si dicha asignación es la más óptima o eficiente para tal valor (del recurso geotérmico). A partir de lo anterior, se exponen y establecen las siguientes conclusiones y hallazgos principales:

- El Salvador ha sido históricamente un país que ha presentado déficit en su oferta de matriz energética (siendo un importador neto), lo que constituye un factor que condiciona los usos y fines que se puedan dar a los insumos energéticos disponibles a nivel nacional.
- Pese a ser El Salvador un país pionero en la explotación de recursos medio ambientales como la geotermia (desde 1972 con la planta de Ahuachapán) que provee servicios tales como la generación de energía eléctrica por medio del calor generado en el subsuelo, este no ha desarrollado una amplia y variada metodología con base en la ciencia económica para establecer una valoración adecuada del recurso ambiental en cuestión, con el fin de disponer de un indicador confiable por medio del cual emplearlo en el uso más eficiente posible para el provecho de la economía nacional.

- Establecer el uso más óptimo de un recurso dado para el incremento del bienestar nacional pasa por establecer el valor económico que dicho recurso tiene, junto a la cantidad que de éste un determinado fin, uso o propósito tenga por requerimiento en comparación a otras opciones alternativas, con el fin de asignar entonces dicho recurso a la finalidad en el que pueda ser aprovechado de forma más óptima.
- Dado que en la economía existen bienes y servicios que por su naturaleza carecen de un mercado que pueda establecerles un precio (no obstante si aportan de forma indirecta con bienes y servicios a este), es necesario establecer una forma de determinar ese valor que disponen para así poder darles el uso que más convenga con criterio científico, siendo para el caso de este estudio, la metodología del Método de Cambio de la Productividad la seleccionada, ya que se obtiene por medio del uso de esta (de su versatilidad, fiabilidad y sencillez) en el desarrollo de los procesos requeridos para la obtención de los resultados deseados el valor buscado.
- Basado en el modelo de regresión lineal y en el uso del método de mínimos cuadrados ordinarios, se estimó los parámetros de un modelo cuyo resultado afirma que existe correlación positiva (índice de Pearson 0.5150) entre la variable producción agrícola y energía geotérmica, es decir las variables tienen una asociación directa.
- El resultado del modelo de regresión utilizando RStudio hizo posible la estimación del cambio en la productividad de la producción agrícola en función del aumento de una unidad de energía geotérmica en la magnitud de +0.012350. Es decir, por cada aumento de una unidad de energía geotérmica la producción agrícola aumentará en 0.012350.

- El Método de Cambio en la Productividad (auxiliado por el modelo de regresión lineal por medio del método de mínimos cuadrados ordinarios) hizo posible la estimación del valor económico de la energía geotérmica en función de la producción agrícola, específicamente con base al precio de mercado del maíz en el sector agrícola. Con lo anterior se estimó que el empleo de la energía geotérmica generaría un valor económico por \$223,965,867.81.
- El recurso geotérmico, insumo por el cual es posible generar electricidad de dicha fuente, y que contribuye con el 22% de la oferta de la matriz energética nacional con una capacidad instalada de 204.4 GWh en las dos centrales geotérmicas por ahora (en el 2024) disponibles en el país, sería capaz de minar 3,406.67 bitcoin / año con un costo energético de 60 MWh por unidad de BTC en su intervalo inferior de coste de energía; y una producción de 1,572.31 bitcoin / año con un costo energético de 130 MWh por unidad de BTC en su intervalo de coste más alto de energía para el año 2021.
- Al precio de mercado del bitcoin para el año 2021, el valor económico que supondría emplear el 100% de la capacidad instalada de producción de energía geotérmica generaría un retorno de \$ 108,158,464.40, en su estimación de requerimiento de 130 MWh por unidad de BTC a la cotización de \$68,798.63 por unidad de BTC para el año ya mencionado.
- Al precio de mercado del bitcoin para el año 2021, el valor económico que representaría dedicar el 100% de la capacidad instalada de producción de la energía geotérmica generaría un retorno económico de \$ 243,343,339.53 en su estimación de requerimiento de 60 MWh por unidad de BTC, a una cotización de mercado de \$68,789.63 por unidad de BTC para el año ya citado.

- Utilizar el 100% de la capacidad instalada de la energía geotérmica actualmente generaría en la producción agrícola de maíz un mayor valor económico que dedicar la misma cantidad de recurso energético en minado de bitcoin. Teniendo en cuenta únicamente la variable precio de mercado del bitcoin y la producción de maíz en QQ/Mz, siendo el VE del recurso geotérmico en la producción de maíz de \$223,965,867.81, y el VE del bitcoin (para escenarios de costo energético de 130 MWh a precios de bitcoin del 2021) de \$108,158,464.40, resultando en una diferencia de \$115,807,403.41, haciendo ejercicio del principio precautorio al tomar en cuenta el escenario menos halagüeño para el VE de BTC.
- El empleo de recursos geotérmicos en bitcoin puede producir un incremento en la presión de la demanda de la matriz energética nacional (dado que El Salvador en el 2022 importaba el 15% de sus insumos de energía), al emplear dichos recursos energéticos existentes en nuevos fines, lo que obligaría al país a cubrir dicha diferencia ya sea con nuevos desarrollos internos de fuentes de energía, o condicionando su mercado energético al incremento de las importaciones para suplir la nueva demanda interna existente.
- El Sistema de Valoración Económica (SVE) del recurso ambiental geotérmico proporcionó estimaciones apropiadas para asignar el mejor uso posible de dicho recurso (entre los dos usos mencionados en el trabajo), sirviendo como una guía alternativa en la elaboración de propuestas de políticas públicas como el minado de bitcoin en El Salvador, en función de proveer a los tomadores de decisión pública, a la comunidad académica o a quien lo necesite de información con rigor científico que ayude a cimentar el camino en la mejor resolución posible de la problemática en cuestión para el beneficio nacional.

- Ampliar y diversificar la matriz energética es pertinente para alcanzar un “orden de cosas” más favorable al interés público (ya que está en línea con una gestión más óptima de un recurso ambiental dado). El crecimiento de la producción de fuentes renovables de energía, la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y la autosuficiencia energética (como medio para obtener superávits al vender el excedente al mercado regional) son metas acordes con este fin.
- La migración progresiva hacia una matriz energética de fuentes renovables como la geotérmica mejora la seguridad energética de un país al reducir la dependencia a las importaciones de combustibles fósiles. Lo anterior ayuda también a reducir la vulnerabilidad económica ante choque externos (como las fluctuaciones de precios, su disponibilidad en el mercado, etc.), por lo que se considera -a la luz del presente estudio- un proceso crucial para abordar los desafíos ambientales, económicos y de seguridad energética.

3.2. Recomendaciones

La investigación y posterior análisis efectuados revelan la patente necesidad, por parte de El Salvador, de plantear y desarrollar herramientas metodológicas y científicas con las cuales poder contar con criterios basados en la realidad, para tomar las mejores decisiones que permitan repercutir de forma positiva en la realidad de aquellos que serán los receptores de estas políticas formuladas y ejecutadas por los tomadores de decisión pública. Actualmente, en El Salvador no hay una discusión amplia acerca del desarrollo de estas metodologías para cuestiones tan necesarias como la valoración de los recursos ambientales, como es el caso de estudio de la energía geotérmica. En base a los hallazgos y conclusiones desarrolladas en la investigación presente, se proponen los siguientes puntos para solventar la problemática de forma satisfactoria a los intereses del pueblo salvadoreño, llevando a la ciencia económica al servicio del bienestar de la mayoría de la población:

Ampliación y diversificación de la matriz energética nacional

- Reducción gradual de la demanda de insumos energéticos de origen fósil (ya sea por vía de impuestos a estos y/o subsidios a sus bienes sustitutos), contribuyendo a la construcción de una economía sustentable, a la vez que se favorece al bienestar social por medio de una mayor disponibilidad de fuentes de energía ecológicas con las que estimular la actividad económica nacional, y de forma indirecta abaratar el costo de la vida.
- Incentivar o fomentar la inversión en fuentes de energía renovables, como la solar, eólica, hidráulica, y en especial la geotérmica (ampliando su capacidad), fortaleciendo a la economía salvadoreña ante los posibles choques externos relacionados con la fluctuación de precios de los insumos energéticos, reduciendo así la dependencia nacional a las importaciones de energía.
- Elevar la capacidad instalada para explotar y aprovechar los recursos geotérmicos disponibles en El Salvador, reforzando e incrementando la experiencia técnica y científica que el país dispone en materia de generación de electricidad por vía de la geotermia (aumentado el capital técnico y humano).
- Reformar el marco regulatorio de las políticas referentes a la energía, con el fin de proporcionar al estado salvadoreño de herramientas adicionales con las cuales poder efectuar las acciones que sean necesarias para la ejecución de los proyectos relacionados con la ampliación y explotación de la energía geotérmica (reformas a la Ley General de Electricidad principalmente).

Establecimiento de un Sistema Nacional de Contabilidad de los R. Ambientales

- Impulsar la creación de un sistema de contabilidad nacional con el cual tener un cálculo económico con el que efectuar la valoración de recursos naturales como el recurso geotérmico (siendo estudios como el presente, los que de forma

empírica confirman la viabilidad de realizar dicha propuesta). Esto con el fin de tener insumos teóricos con rigor científico, con los que contar con un punto de partida del cual sea posible formular políticas públicas con base técnica en la realidad, para emplear dichos recursos de la forma más eficiente posible.

- Establecer tal sistema de contabilidad por medio de metodologías que dispongan de aceptación en la comunidad académica (como es el caso del MCP), ello con el fin de garantizar la solidez de la información producida en este, así como su validez y pertinencia en la toma de decisiones y formulación de políticas públicas, sobre todo las que competen a la gestión de recursos ambientales como el geotérmico.
- Fortalecer el funcionamiento y sostenibilidad de dicho sistema por medio de inversiones públicas que permitan su operación a través de los medios más punteros en tecnología, con el fin de obtener el mayor provecho posible de este en la gestión de recursos ambientales como la energía geotérmica.

Evaluación profunda de los impactos de la política de minado de bitcoin

- Rediseñar el proyecto de minado de bitcoin con el fin de determinar y efficientizar el nivel de consumo energético real proyectado por este, y así poder gestionar su impacto en la demanda energética nacional de forma más favorable, a fin de poder satisfacerla sin agravar la problemática de la seguridad energética salvadoreña, con lo cual potenciar el desarrollo económico de la nación.
- Estimar el impacto de la generalización y masificación del uso de la moneda bitcoin en la economía salvadoreña, así como las consiguientes consecuencias en los requerimientos de minado, con el fin de prever los ajustes y correcciones necesarios en la oferta energética nacional, mientras se desarrollan todas las potencialidades que de su uso puedan derivarse.

Fomento de la transición a economías y fuentes de energía más sostenibles

- Establecer marcos legales favorables a las inversiones en tecnologías relacionadas con formas ecológicas de generación de energía, (mientras se cierra la brecha en importaciones energéticas en favor de una economía más verde), reduciendo gradualmente la actual diferencia existente entre el nivel de producción energética actual y el nivel demandado, favoreciendo la migración a fuentes de energía más sostenibles a la vez que se consolida la seguridad energética salvadoreña.
- Reforzar los lazos con la cooperación internacional (con países y empresas referentes del sector) en el campo de la generación de energía eléctrica por medio de la geotermia (así como en otros rubros posibles), con el fin de situar al país en la vanguardia en dicho sector, consolidando el capital técnico y humano disponible a nivel nacional (por medio de transferencias tecnológicas de ser posible), favoreciendo la migración hacia formas de generación de energía más sostenibles.
- Incentivar la investigación y desarrollo local en los campos de la generación de electricidad por energía geotérmica con el fin de consolidar, y posteriormente ampliar, las capacidades existentes en El Salvador en materia de dicho campo, asegurando así en una parte la transición hacia una economía ambientalmente sustentable y sostenible, mientras se garantiza la seguridad energética nacional y el bienestar de la población.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Internacional de la Energía (IEA). (2024). "Energy Statistics Data Browser".
<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/>
- Agencia Internacional de la Energía (IEA). (2020). "Renewables 2020: Analysis and forecast to 2025".
- Aguilera, D. U. (2006). El valor económico del medio ambiente. *Ecosistemas*, 15(2).
- Alvarado, E. et al (2022). Mapa de Potencial Geotérmico de El Salvador. UES, San Salvador, El Salvador.
- Apraez, J. J., et al. (2022). Análisis del impacto ambiental por el consumo energético en la producción del bitcoin a nivel mundial. *Revista Loginn: Investigación Científica Y Tecnológica*, 6(2). <https://doi.org/10.23850/25907441.4800>
- Banco Mundial. (2010). "Biofuels: The Promise and the Risks". The World Bank.
- Banco Mundial. (2024). "DataBank". <https://databank.worldbank.org/>
- BCR. (2018). Glosario de términos técnicos y conceptos económicos. El Salvador.
- Blanchard, O., & Pérez Enri, D. (2012). *Macroeconomía: Teoría y Política Económica con Aplicaciones a América Latina*. Buenos Aires: Pearson Educación.
- Bona, P., & Coviello, M. (2016). *Valoración y Gobernanza de los Proyectos Geotérmicos en América del Sur*
- Cáceres, G. (2008). *"La gerencia ambiental como metodología integradora del conocimiento para la administración y gestión del ambiente"*. U. de los Andes, Mérida, Venezuela.
- Carrasco, S. (2016). *Metodología de la investigación científica*. (1ª. ed.). San Marcos.
- CBECI. (2024). Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index. <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci>

- CoinMarketCap. (2024). Cryptocurrency Prices, Charts and Market Cap. <https://coinmarketcap.com>
- Consejo Nacional de Energía (CNE). “*Política energética nacional de El Salvador 2010-2014*”.
- Constitución de la República de El Salvador. (1983). San Salvador, El Salvador.
- Consultoría Estratégica de Investigaciones de Mercado. (2024). ¿Qué es el coeficiente de relación de Pearson? <https://www.cimec.es/coeficiente-correlacion-pearson/>
- Costanza, R., et al. (1997). The Value of the World’s Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature*, (387), 253-260
- Cristeche, E. & Penna, J. (2008). “*Métodos de valoración económica de los servicios ambientales*”. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Datosmacro.com. (2024). Expansión / datosmacro.com. <https://datosmacro.expansion.com/...energia-y-medio-ambiente/electricidad-consumo/el-salvador>
- Delacámara, G. (2008). “*Guía para decisores. Análisis económico de externalidades ambientales*”. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago de Chile.
- De Paula, G., & Lorenzo, C. (2009). Inseguridad energética y gestión de recursos naturales estratégicos: análisis de la política de biocombustibles en Argentina en el contexto global. *Revista UNISCI*, (20), 60-77.
- De Vries, A. (2020). Bitcoin’s energy consumption is underestimated: A market dynamics approach. *Energy Research & Social Science*, 70, 101721.
- DIGESTYC. (2022). Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples (EHPM). San Salvador, El Salvador.

- Dixon, J., & Pagiola, S. (1998). Análisis económico y evaluación ambiental. *Environmental Assessment Sourcebook*, 1-17.
- EERE. (2024). Oficina de Eficiencia Energética y Energía Renovable (EERE, siglas en inglés). <https://usa.gov/es/agencias/oficina-de-eficiencia-energetica-y-energia-renovable>
- FAO. (2011). “Energy-Smart Food for People and Climate”.
- Foster, L. V. (2007). “A Brief History of Central America”. Facts on File, Inc.
- Galaxy Digital Research. (2022). “2022 Mid-Year Bitcoin Mining Update”. Nueva York, USA.
- Gálvez, J. y Carrera, L. (2015). “Las cuentas de Capital Natural Guatemalteco”. Universidad Rafael Landívar
- Giudici, G., Milne, A., & Vinogradov, D. (2020). Cryptocurrencies: market analysis and perspectives. *Journal of Industrial and Business Economics*, 47, 1-18.
- Gómez, G. R., Flores, J. G., & Jiménez, E. G. (1996). Metodología de la investigación cualitativa.
- Gómez, M. R. (2004). Regulación y mercado. *La regulación económica: Tendencias y desafíos*, 31.
- Gujarati D. (2009). “*Econometría*”, 5ta edición. México.
- Hernández, A., Caballero, R., León, M.A., Casas, M., Pérez, V.E., & Silva, C.L. (2014). Multi-criteria decision modeling for environmental assessment. An estimation of Total Economic Value in protected natural areas. *International Journal of Environmental Research*, 8 (3), 551-560.
- Hiriart, G. (2011). “Evaluación de la Energía Geotérmica México”. México.

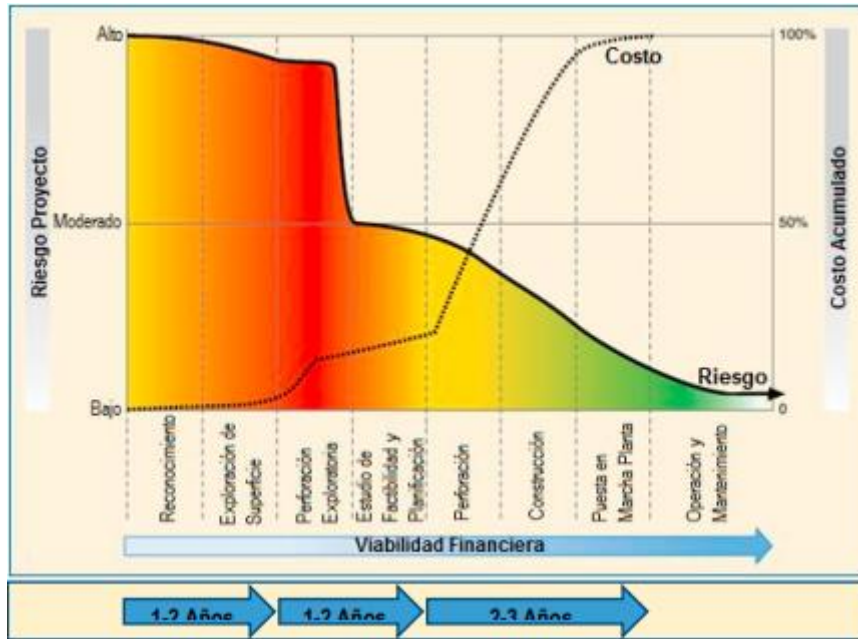
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). Evaluación del Estado de Preparación de las Energías Renovables. Abu Dabi.
- Izko Xavier y Burneo Diego (2003). “Herramientas para la Valoración y Manejo Forestal Sostenible de los Bosques Sudamericanos”. UICN-Su
- Katsiampa, P. (2019). “*An empirical investigation of volatility dynamics in the cryptocurrency market*”. The University of Sheffield.
- Katz, J. (2020). “*Recursos naturales y crecimiento: aspectos macro y microeconómicos, temas regulatorios, derechos ambientales e inclusión social*”. CEPAL.
- Kolstad, C. (2001). “*Economía Ambiental*”. México.
- Küfeoğlu, S. & Özkuran M. (2019). “ENERGY CONSUMPTION OF BITCOIN MINING”. University of Cambridge.
- Lagos, S. (2017). *Estudio de factibilidad para la instalación de una central geotérmica en Chile*.
- Ley Bitcoin. (2021), El Salvador.
- Ley de Medio Ambiente. (1998), El Salvador.
- Ley General de Electricidad. (1996). San Salvador, El Salvador.
- Llamas, P. L., López, C. R. (2008). Economía y medio ambiente: herramientas de valoración ambiental. In *Tratado de tributación medioambiental* (pp. 1189-1225).
- Lomas, P. Martín, B. Louit, C. Montoya, D. Montes, C. (2005). “*Guía práctica para la valoración económica de los bienes y servicios ambientales de los ecosistemas*”. Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España.
- Lund, J. W., Freeston, D. H., & Boyd, T. L. (2020). “Direct utilization of geothermal energy, 2010 worldwide review”. New Zeland.

- Mendieta, J. C. (2000). *“Economía del Medio Ambiente”*. Colombia.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2024). Anuario de Estadísticas Agrop. 2021-2022. <https://www.mag.gob.sv/wp-content/uploads/2022/12/Anuario-de-Estadísticas-Agropecuarias-2021-2022.pdf>
- Ministry of Electronics & Information Technology (MeitY). Gov. of India. (2021) *“National Strategy of Blockchain”*. India.
- Montibeller-Filho, G. (2008). O mito do desenvolvimento sustentável: meio ambiente e custos sociais no moderno sistema produtor de mercadorias. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. *Decentralized business review*.
- Othman, A. Dr. & Bob, A. Dr. (2022). *“Bitcoin Mining’s Energy Consumption and Global Carbon Dioxide Emissions: Wavelet Coherence Analysis*. Arab Monetary Fund.
- Ramírez, R. Herrera, H. et al (2017). *“Metodología para cuantificar costos y beneficios ambientales del desarrollo de las obras de transmisión”*. Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). Bogotá, Colombia.
- Ripka, Adriana. Luiz Da Silva, Christian & Santoyo, Álvaro. (2018). Métodos de valoración económica ambiental: instrumentos para el desarrollo de políticas ambientales. *Revista Universidad Y Sociedad*, 10(4), 246–255.
- Rodriguez, C. A. C. (2018). Gamificación en educación superior: experiencia innovadora para motivar estudiantes y dinamizar contenidos en el aula. *EDUTECH. Revista electrónica de tecnología educativa*, (63), 29-41.
- Sampieri, R. (2010). *“Metodología de la Investigación”*, México.

- Sánchez, J. C. M. (2021). La dependencia energética de los países subdesarrollados. *HUMAN REVIEW. International Humanities Review/Revista Internacional de Humanidades*, 10(1), 19-36.
- Santoyo, E., Barragán, R. (2010). *La Energía Geotérmica, México*.
- Schroeder, Roger G. (2006). *“Administración de operaciones: conceptos y casos contemporáneos”*. McGraw Hill.
- Seinfeld, J. Cuzquén, G. Farje, G. y Zaldívar, S. (1998). *“Introducción a la economía de los recursos naturales y del medio ambiente”*. Universidad del Pacífico, Perú.
- SIGET. (2024). “Boletín de Estadísticas Eléctricas” (El Salvador). <https://www.siget.gob.sv/gerencias/electricidad/informe-de-mercado-y-estadisticas-electricas/estadisticas-electricas/>
- Statista. (2024). El portal de estadísticas para datos de mercado. <https://es.statista.com>
- Valenzuela Feijóo, J. (1997). Cinco dimensiones del modelo neoliberal. *Política y cultura*, núm. 8, primavera, 9-38.
- Tilley, V. Q. (2005). *“Seeing Indians: A Study of Race, Nation, and Power in El Salvador”*. University of New Mexico Press.
- Tomasini, D. (2000). *Valoración Económica del Ambiente*. Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Unidad de Transacciones. (2024). “Menu Reportes Estadísticos”. <https://www.ut.com.sv/reportes>
- Useche, A. J. (2022). Monedas Digitales. *Revista Sistemas*, (163), 107-117.
- Willebald, H. y Sandonato, S. (2014). *“Indicadores de capital natural”*. Red Sudamericana de Economía Aplicada.

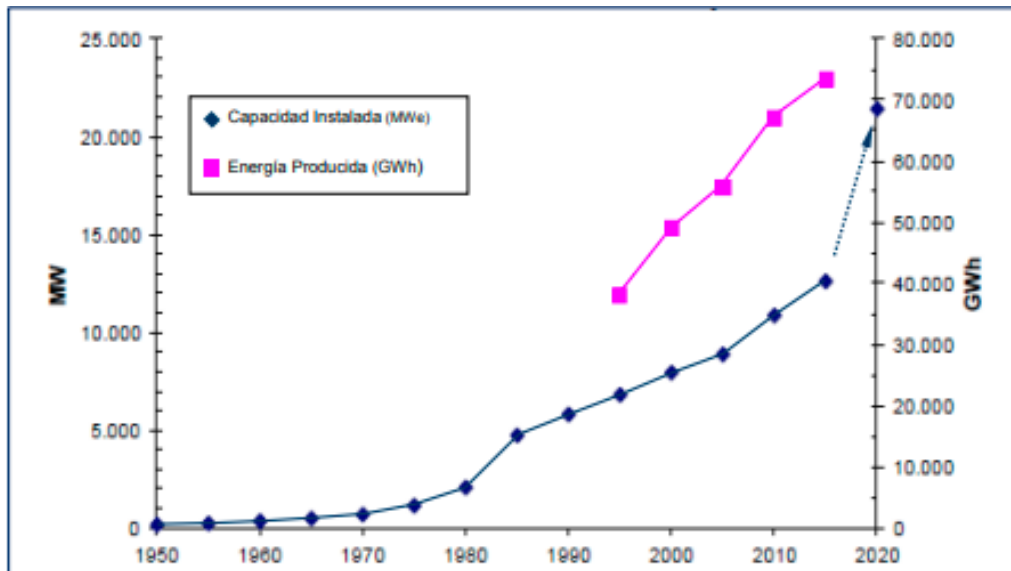
ANEXOS

Anexo 1. Costos y riesgos de un proyecto geotérmico en sus etapas de desarrollo



Fuente: Bona P., & Coviello, M., D. Valoración y Gobernanza de los Proyectos Geotérmicos en América del Sur. (2016), pp. 19

Anexo 2. Evolución de la capacidad geotérmica-eléctrica instalada en el mundo (2020)



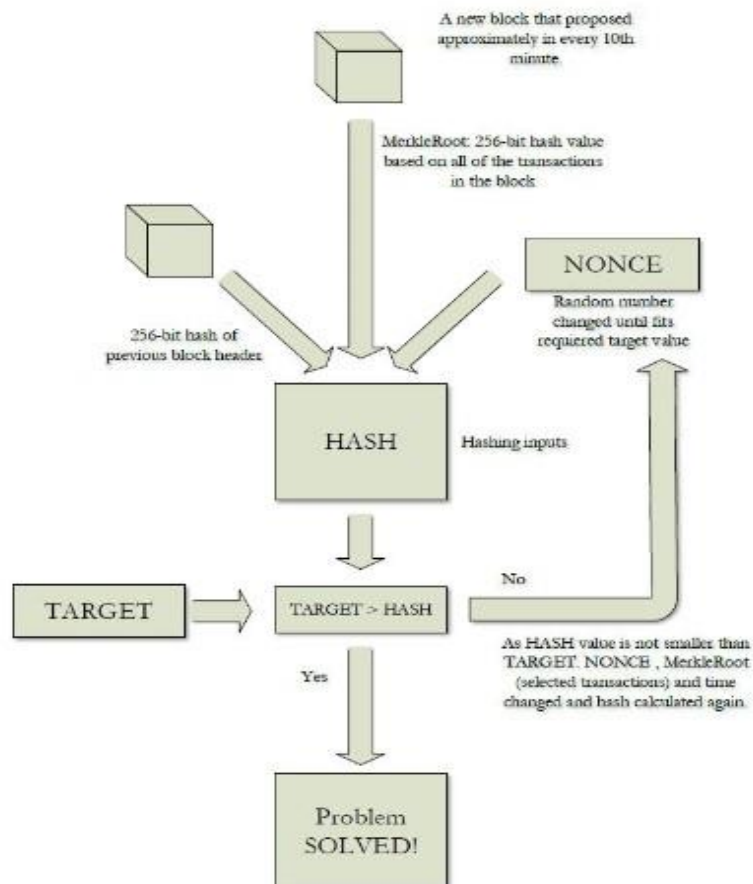
Fuente: Bona P., & Coviello, M., D. Valoración y Gobernanza de los Proyectos Geotérmicos en América del Sur. (2016), pp. 14

Anexo 3. Plantas geotermoeléctricas en operación en el mundo (por zonas)



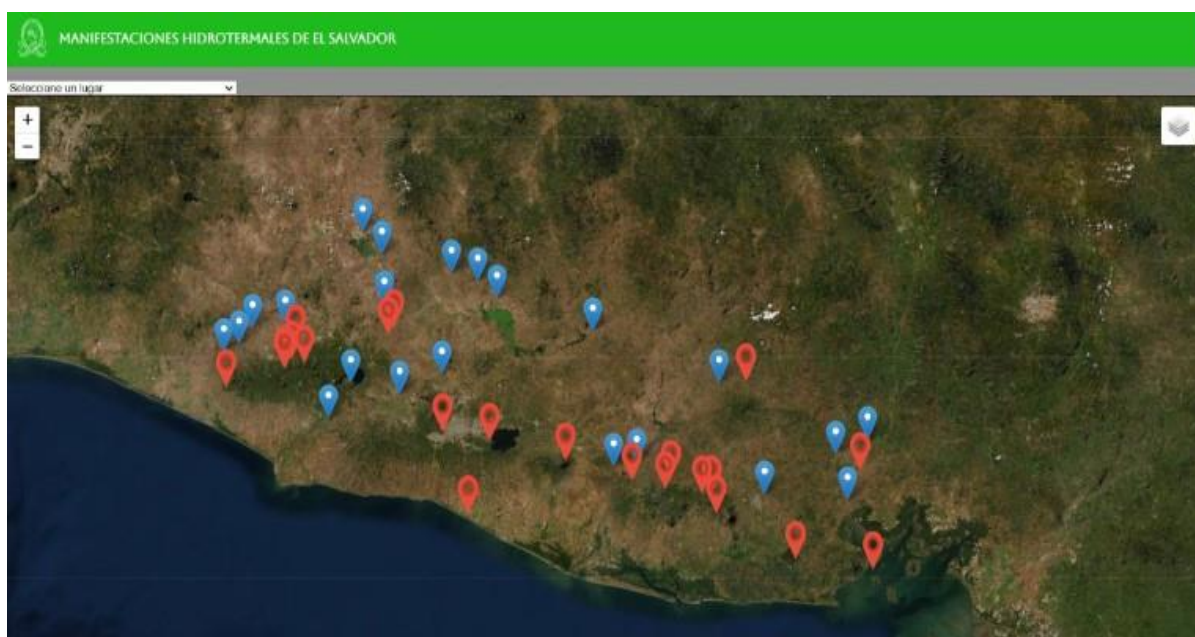
Fuente: Bona P., & Coviello, M., D. Valoración y Gobernanza de los Proyectos Geotérmicos en América del Sur. (2016), pp. 15

Anexo 4. Esquema de funcionamiento simple de una cadena de bloques



Fuente: Küfeoğlu, S. & Özkuran M. "ENERGY CONSUMPTION OF BITCOIN MINING". (2019)

Anexo 5. Mapa de potencial geotérmico de El Salvador (2021)



Fuente: Alvarado E., et al. Mapa de Potencial Geotérmico de El Salvador. (2022), pp. 164

Anexo 6. Importaciones de energía, valor neto (% uso de energía)

IMPORTACIONES DE ENERGIA, VALOR NETO (% USO DE ENERGIA)					
AÑO	C - PE	AÑO	C - PE	AÑO	C - PE
1971	28.37	1986	27.58	2001	44.98
1972	30.90	1987	29.27	2002	45.15
1973	32.74	1988	30.83	2003	45.81
1974	31.21	1989	31.99	2004	45.44
1975	30.96	1990	31.44	2005	44.79
1976	27.18	1991	36.72	2006	44.45
1977	27.06	1992	38.30	2007	47.89
1978	26.57	1993	41.86	2008	44.60
1979	26.13	1994	44.50	2009	47.49
1980	24.08	1995	46.67	2010	46.63
1981	21.09	1996	43.23	2011	47.61
1982	19.97	1997	47.91	2012	48.64
1983	20.79	1998	49.39	2013	48.31
1984	20.85	1999	47.19	2014	49.24
1985	23.48	2000	46.60		

Fuente: Elaboración con base a datos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) (2024), y DataBank (Base de Datos del Banco Mundial, 2024). Se aplicó formato condicional indicando los valores verdes (valores menores) y valores rojos (valores mayores) para la relación C - PE (Consumo - Producción de Energía).

Anexo 7. Precio promedio de mercado de energía en ESA para el 2021 (US\$ / kWh)

MES	(US\$/MWh)
Enero	68.39
Febrero	81.04
Marzo	101.56
Abril	106.86
Mayo	117.18
Junio	113.84
Julio	107.54
Agosto	81.17
Septiembre	83.98
Octubre	130.71
Noviembre	129.35
Diciembre	122.04
Promedio Anual	103.64

Fuente: Elaboración con base a datos estadísticos de la Unidad de Transacciones (2022):

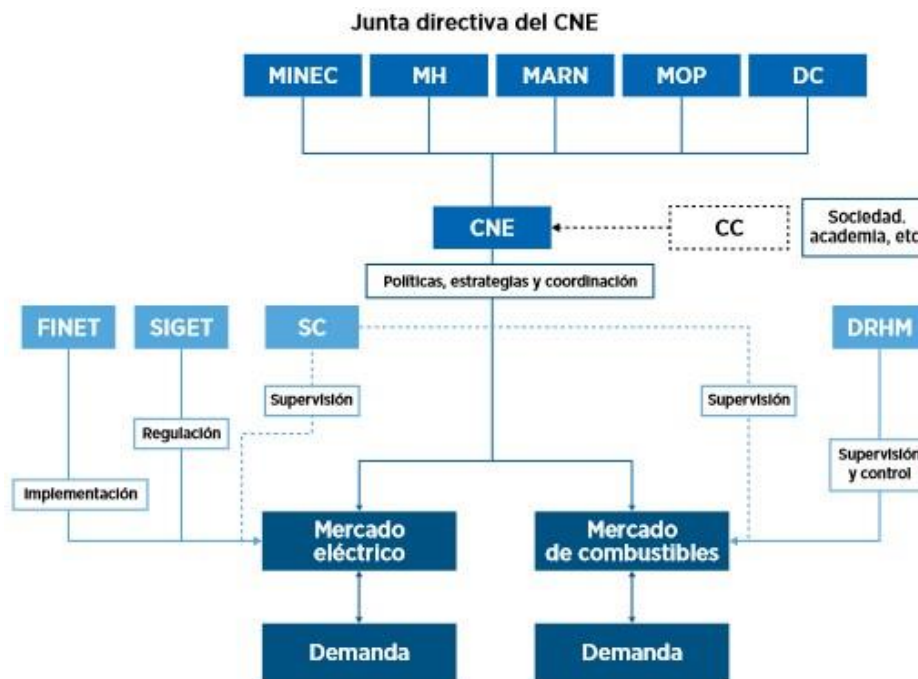
<https://www.ut.com.sv/reportes>

Anexo 8. Configuración del sistema de generación y transmisión de electricidad (2018)



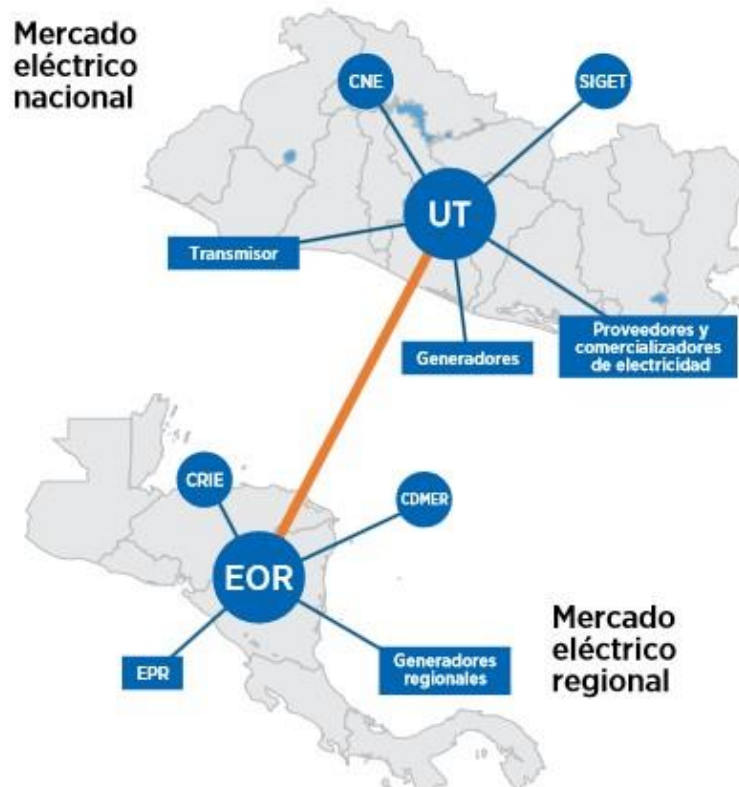
Fuente: IRENA. Evaluación del Estado de Preparación de las Energías Renovables. (2020), pp. 24

Anexo 9. Estructura institucional del sector energético (2012)



Fuente: IRENA. Evaluación del Estado de Preparación de las Energías Renovables. (2020), pp. 27

Anexo 10. Estructura general del sector energético (2016)



Fuente: IRENA. Evaluación del Estado de Preparación de las Energías Renovables. (2020), pp. 25

Anexo 11. Interrelaciones institucionales en el ramo de geotermia (2012)



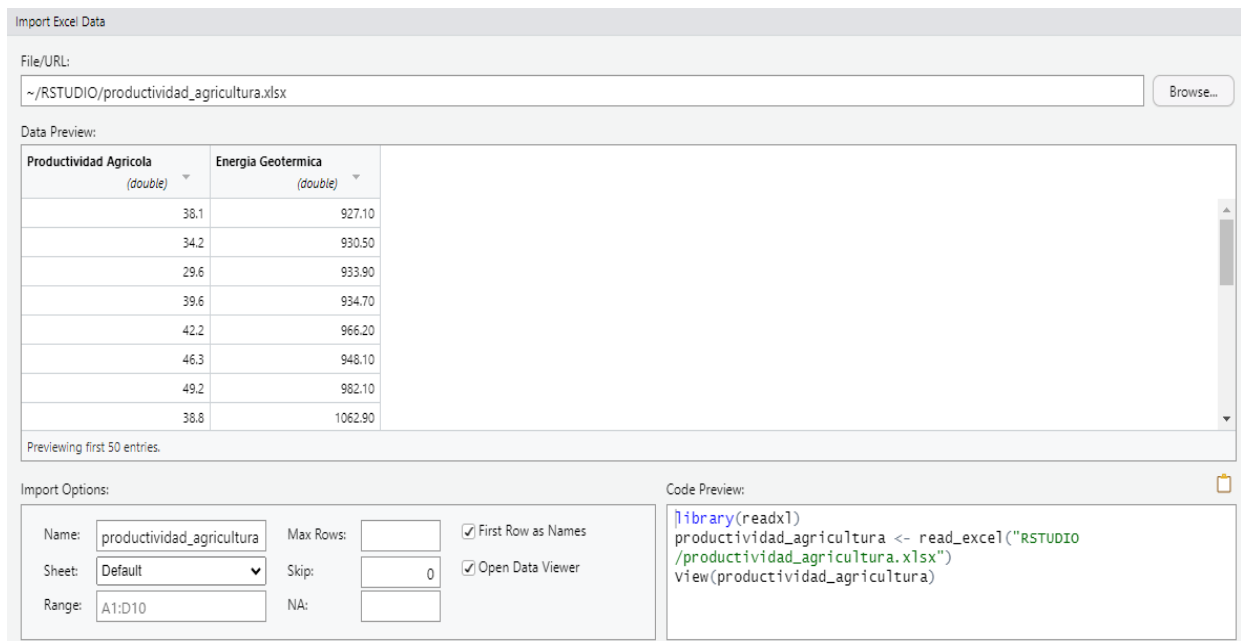
Fuente: Bona P. Valoración y Gobernanza de los Proyectos Geotérmicos en América del Sur. (2016), pp. 20

Anexo 12. Base de datos producción agrícola (qq) y energía (Gw/h) (Años 1999 - 2021)

Tiempo	Produccion Agricola	Energia Geotermica
1999	14,342,600	927.1
2000	12,673,200	930.5
2001	12,429,497	933.9
2002	14,014,886	934.7
2003	13,815,565	966.2
2004	14,570,092	948.1
2005	18,060,868	982.1
2006	13,530,506	1062.9
2007	15,387,155	1293
2008	19,101,700	1421
2009	17,291,237	1420.9
2010	16,898,486	1421.1
2011	16,639,750	1430
2012	20,368,465	1420.4
2013	19,067,431	1442.5
2014	17,811,118	1443.9
2015	15,629,779	1432.42
2016	20,316,389	1467.16
2017	19,892,479	1459.94
2018	15,081,204	1437.25
2019	17,291,805	1372.72
2020	17,105,532	1449.99
2021	18,407,720	1451.6

Fuente: Elaboración con base a Anuarios de Estadísticas Agropecuarias, Encuesta Nacional Agropecuaria de Propósitos Múltiples, (2021-2022), MAG (2024), DGEA-MAG. Y Estadísticas Eléctricas, boletines (1999 - 2021), Superintendencia General de Electricidad (SIGET), (2024).

Anexo 13. Variable endógena y exógena aplicada en RStudio para diagrama de dispersión



Import Excel Data

File/URL:

Data Preview:

Productividad Agricola (double)	Energia Geotermica (double)
38.1	927.10
34.2	930.50
29.6	933.90
39.6	934.70
42.2	966.20
46.3	948.10
49.2	982.10
38.8	1062.90

Previewing first 50 entries.

Import Options:

Name: Max Rows:
Sheet: Skip:
Range: NA:

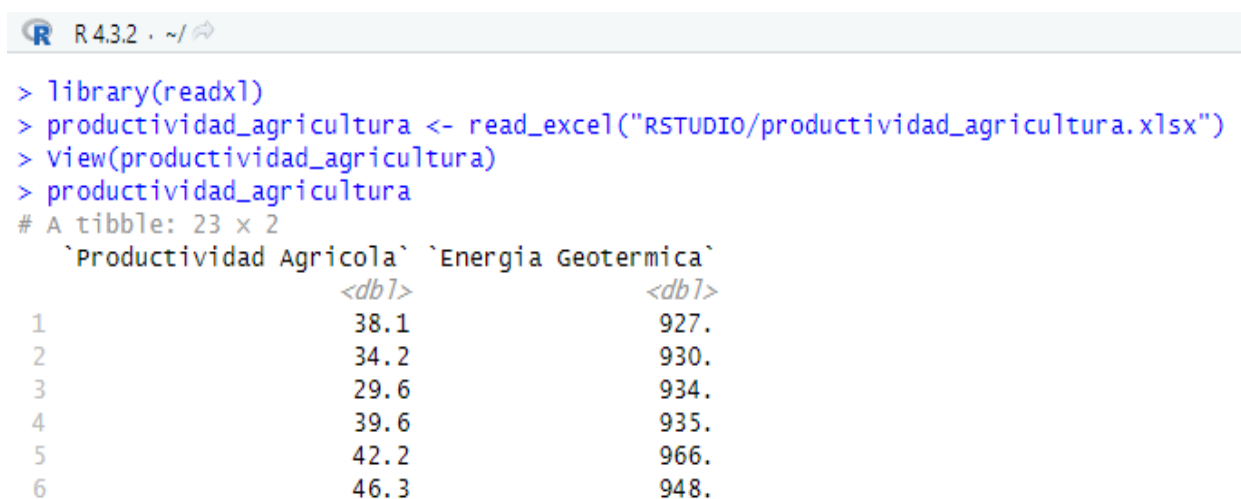
First Row as Names
 Open Data Viewer

Code Preview:

```
library(readxl)
productividad_agricultura <- read_excel("RSTUDIO
/productividad_agricultura.xlsx")
view(productividad_agricultura)
```

Fuente: Elaborado con software econométrico RStudio (versión 4.3.2)

Anexo 14. Cargado de librerías y base de datos en RStudio.



```
R 4.3.2 · ~/ ↻
> library(readxl)
> productividad_agricultura <- read_excel("RSTUDIO/productividad_agricultura.xlsx")
> view(productividad_agricultura)
> productividad_agricultura
# A tibble: 23 × 2
  `Productividad Agricola` `Energia Geotermica`
    <dbl>                <dbl>
1         38.1             927.
2         34.2             930.
3         29.6             934.
4         39.6             935.
5         42.2             966.
6         46.3             948.
```

Fuente: Elaborado con software econométrico RStudio (versión 4.3.2)

Anexo 15. Superficie destinada a producción de maíz por manzana (2022)

EL SALVADOR				
SUPERFICIE, PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTO DE DIFERENTES CULTIVOS				
AÑO AGRÍCOLA 2021-2022				
CULTIVO	SUPERFICIE (Mz)	PRODUCCIÓN		RENDIMIENTO (UNIDAD/Mz)
		VOLUMEN	UNIDAD	
Maíz	376,229	18,407,720	Quintal	48.9

Fuente: Encuesta Nacional Agropecuaria de Propósitos Múltiples (ENAPM 2021-2022), MAG (2024), DGEA-MAG (2022).

Anexo 16. Precios promedios de granos básicos El Salvador (2021)

EL SALVADOR					
GRANOS BÁSICOS					
PRECIOS PROMEDIO A NIVEL MAYORISTA, PLAZA CALLE GERARDO BARRIOS, SAN SALVADOR, SEGÚN MES					
2021					
(DÓLARES/QUINTAL)					
MESES	ARROZ ORO PRIMERA CLASE NACIONAL	FRIJOL ROJO DE SEDA NACIONAL	FRIJOL TINTO O CORRIENTE NACIONAL	MAÍZ BLANCO	SORGO
Enero	38.8	62.1	57.1	14.7	14.0
Febrero	38.8	59.4	54.4	14.4	13.3
Marzo	38.8	57.6	52.5	15.0	13.6
Abril	38.8	54.2	49.5	15.6	14.7
Mayo	38.8	53.4	47.8	15.8	14.7
Junio	38.8	53.1	47.5	16.0	14.8
Julio	38.7	52.8	45.6	16.9	15.8
Agosto	38.8	53.9	43.3	17.5	16.6
Septiembre	38.7	55.9	45.4	18.4	16.9
Octubre	38.8	56.7	48.0	19.0	17.4
Noviembre	38.7	57.3	49.4	19.8	22.0
Diciembre	38.8	58.6	51.5	19.8	23.5
Promedio	38.8	56.3	49.3	16.9	16.4

Fuente: Investigación de precios en mercados nacionales. Base de datos SIMAGRO, MAG (2024), DGEA-MAG (2022).

Anexo 17. Producción anual mundial de BTC dividido por periodo halving

CANTIDAD BTC MUNDIAL	PERIODO HALVING	Nº EVENTO
2,268,000	2009	1
2,268,000	2010	
2,268,000	2011	
2,268,000	2012	
1,314,000	2013	2
1,314,000	2014	
1,314,000	2015	
1,314,000	2016	
657,000	2017	3
657,000	2018	
657,000	2019	
657,000	2020	
328,500	2021	4
17,284,500		

Fuente: Elaboración con base a datos de sitio web especializado en BTC, CoinMarketCap. (2024).

Anexo 18. Precio histórico del BTC (2011 - 2021)



Fuente: Datos históricos de sitio especializado en criptomonedas, CoinMarketCap. (2024).

Anexo 19. Lista de precios máximos del BTC (2009 - 2021)

AÑO	PRECIO MAXIMO	FECHA EXACTA
2009	\$ -	-
2010	\$ 0.39	6-nov-10
2011	\$ 31.91	8-jun-11
2012	\$ 13.51	28-nov-12
2013	\$ 1,156.10	4-dic-13
2014	\$ 951.39	1-ene-14
2015	\$ 465.50	25-dic-15
2016	\$ 979.45	30-dic-16
2017	\$ 19,783.06	17-dic-17
2018	\$ 17,527.00	6-ene-18
2019	\$ 13,796.49	26-jun-19
2020	\$ 28,990.90	31-dic-20
2021	\$ 68,789.63	1-nov-21

Fuente: Elaboración con base a sitio especializado en criptomonedas, CoinMarketCap. (2024).

Anexo 20. Una abstracción de El Salvador como minador 5% de BTC a nivel mundial (2009-2021).

PRODUCCION BTC	ENERGIA GEOTERMICA
113,400	1420.9
113,400	1421.1
113,400	1430
113,400	1420.4
65,700	1442.5
65,700	1443.9
65,700	1432.42
65,700	1467.16
32,850	1459.94
32,850	1437.25
32,850	1372.72
32,850	1449.99
16,425	1451.6

Fuente: Elaboración con base a datos del portal especializado CoinMarketCap (2024) para la variable “producción de btc”, y de estadísticas SIGET (2024) para la variable “energía geotérmica”.