

Impacto Ambiental y Soluciones Sostenibles en la Minería de Bitcoin: Un Análisis Dialéctico

Alexandra Martínez Ruiz; Oscar Everardo Flores Choperena

Universidad Iberoamericana de la Ciudad de México

Resumen

Este artículo presenta un análisis dialéctico del impacto ambiental de la minería de Bitcoin, enfocándose en sus contradicciones inherentes y evolución a lo largo del tiempo. Se examinan los efectos ecológicos, como el consumo de energía y las emisiones de carbono, destacando su relevancia para la sostenibilidad ambiental. Según el Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI), se estima que en 2024 la minería de Bitcoin consumirá 146.82 TWh de electricidad y emitirá 74.39 MtCO_{2e}, cifras comparables al consumo energético y emisiones de países como Pakistán y Kenia.

Aunque la minería de Bitcoin genera importantes beneficios económicos, estos vienen acompañados de un significativo costo ambiental. La dependencia de energías no renovables, que constituyen el 62.41% de la energía utilizada, agrava el problema. La promesa de ganancias incentiva la minería, contrastando con la necesidad global de reducir las emisiones de CO₂ y adoptar energías limpias.

El artículo revisa propuestas para mitigar este impacto, como el uso de energías renovables y mejoras en algoritmos de consenso. A pesar de los esfuerzos por integrar energías limpias, el alto consumo energético sigue siendo un desafío.

Se subraya la importancia de políticas de incentivo para energías renovables y tecnologías eficientes, y la colaboración internacional para establecer estándares de sostenibilidad. Este análisis ofrece una base sólida para futuras investigaciones y políticas que busquen equilibrar la innovación tecnológica con la sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: *Minería de Bitcoin, Impacto ambiental, Eficiencia energética, Energías renovables, Sostenibilidad tecnológica.*

Abstract

This article presents a dialectical analysis of the environmental impact of Bitcoin mining, focusing on its inherent contradictions and evolution over time. It examines the ecological effects, such as energy consumption and carbon emissions, highlighting their relevance to environmental sustainability. According to the Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI), Bitcoin mining is projected to consume 146.82 TWh of electricity and emit 74.39 MtCO₂e in 2024, comparable to the energy consumption and emissions of countries like Pakistan and Kenya.

Although Bitcoin mining generates significant economic benefits, it incurs a substantial environmental cost. The reliance on non-renewable energy sources, which constitute 62.41% of the energy used, exacerbates the issue. The promise of substantial profits incentivizes mining, conflicting with the global need to reduce CO₂ emissions and adopt clean energy.

The article reviews proposals to mitigate this impact, such as using renewable energy sources and improving consensus algorithms. Despite efforts to integrate clean energy, the high energy consumption remains a major challenge.

It emphasizes the importance of incentive policies for renewable energy and efficient technologies, as well as international collaboration to establish sustainability standards. This analysis provides a solid foundation for future research and policies aimed at balancing technological innovation with environmental sustainability.

Keywords: *Bitcoin Mining, Environmental Impact, Energy Efficiency, Renewable Energy, Technological Sustainability.*

Antecedentes

Bitcoin es una forma innovadora de dinero digital y descentralizado que ha ganado gran popularidad en los últimos años. Según la Oficina de Responsabilidad Gubernamental de EE.UU. (GAO), Bitcoin es una de las criptomonedas más conocidas y valiosas. No está respaldada por un gobierno o autoridad central y puede transferirse directamente entre partes sin necesidad de un intermediario como un banco (GAO, 2022).

El Banco de la Reserva Federal de St. Louis describe Bitcoin como una forma de dinero digital que se transfiere a través de una red descentralizada de computadoras. Es la criptomoneda más conocida y tiene la mayor capitalización de mercado de todas (Banco de la Reserva Federal de St. Louis, 2022).

La obtención de nuevos bitcoins se realiza mediante un proceso computacional complejo conocido como minería. En este proceso, los mineros compiten para resolver problemas criptográficos y validar bloques de transacciones. Aquellos que logran resolver estos problemas son recompensados con nuevos bitcoins (Banco de la Reserva Federal de St. Louis, 2022). El mecanismo, conocido como "prueba de trabajo" (proof-of-work), ha experimentado gran innovación con el tiempo, llevando al desarrollo de software especializado y hardware optimizado para realizar estos cálculos intensivos de manera más eficiente.

Problemática

La industria de las criptomonedas, aunque relativamente nueva, enfrenta un desafío significativo en términos de su impacto ambiental y consumo energético excesivo. Esta problemática se centra específicamente en la minería de Bitcoin mediante el mecanismo de prueba de trabajo (proof-of-work), que es extremadamente intensivo en el uso de energía. A pesar de la migración a hardware más eficiente, como los circuitos integrados de aplicación específica (ASIC), el proceso de minería consume cantidades masivas de energía, gran parte de la cual se desperdicia debido a la naturaleza del algoritmo de "prueba de fuerza bruta" utilizado (Cambridge Centre for Alternative Finance, 2023).

Según estimaciones para 2024, el consumo energético de Bitcoin alcanzará los 146.82 TWh, representando el 0.58% de la producción mundial de electricidad y el 0.22% de la producción mundial de energía (CBECI, 2024). Además, se estima que las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la minería de Bitcoin alcanzarán las 74.39 MtCO₂e en 2024, un aumento significativo en comparación con años anteriores (CBECI, 2024). Esta estimación parece confirmarse con la figura 1, que muestra el aumento antes mencionado.

Total Bitcoin greenhouse gas emissions

Select an area by dragging across the lower chart

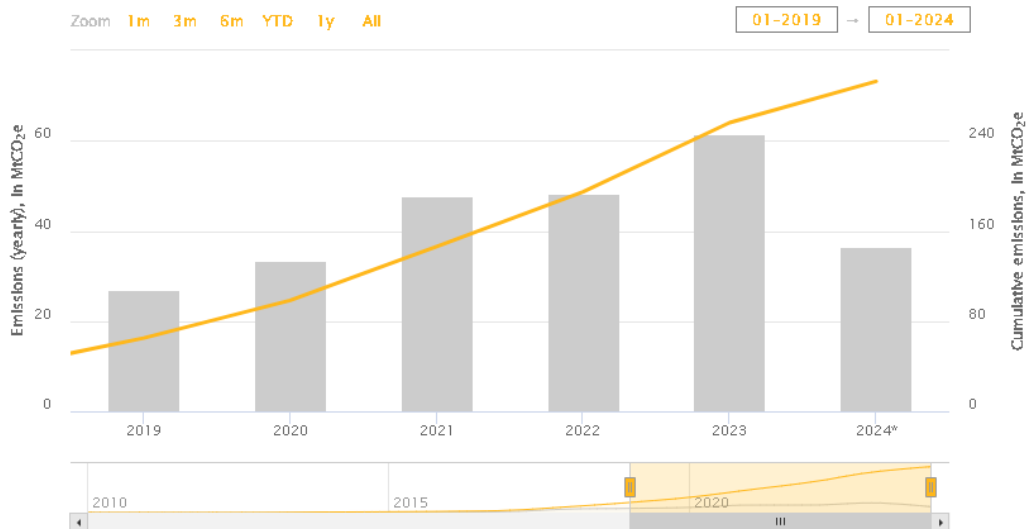


Figura 1. Emisiones totales de gases de efecto invernadero del bitcoin (CBECI,2024)

Además de las consideraciones ambientales, el costo de la minería de Bitcoin es un factor relevante, con un costo medio estimado de \$17,000 USD para minar un Bitcoin en 2023.

En la figura 2 se puede observar un aumento significativo en el consumo de electricidad. Esto se debe a que, aunque el software se ha vuelto más eficiente y requiere menos energía, el número de dispositivos de minería ha aumentado, incluyendo dispositivos antiguos menos eficientes que siguen en uso. Esta situación ha llevado a un mayor consumo de electricidad en general. A diferencia de sus predecesores, los ASIC están diseñados para ejecutar operaciones específicas, lo que resulta en una eficiencia sin igual, aunque a expensas de su versatilidad.

El desarrollo tecnológico más importante desde la creación de los ASIC ha sido la reducción progresiva del tamaño de los chips, pasando de 130 nm (nanómetros) en 2013 a 5 nm en los modelos recientes (Cambridge Centre for Alternative Finance, 2023). Esto ha mejorado significativamente la eficiencia de la minería; cuanto más pequeño es el chip, menos energía eléctrica se necesita para transmitir datos. Sin embargo, cada vez es más evidente que el ritmo de los avances tecnológicos se ha ralentizado y estabilizado. Esta desaceleración significa que los dispositivos mineros más antiguos siguen siendo rentables durante más tiempo, lo que lleva a ciclos prolongados de reemplazo de dispositivos. Aunque estos dispositivos antiguos son menos eficientes energéticamente, siguen siendo utilizados debido a que el alto precio del Bitcoin los mantiene rentables. El uso continuo de estos dispositivos de minería antiguos y menos eficientes es una de las razones por las que el consumo total de energía sigue aumentando, a pesar de las mejoras en la eficiencia de los nuevos modelos (Cambridge Centre for Alternative Finance, 2023)

Total Bitcoin electricity consumption

Select an area by dragging across the lower chart

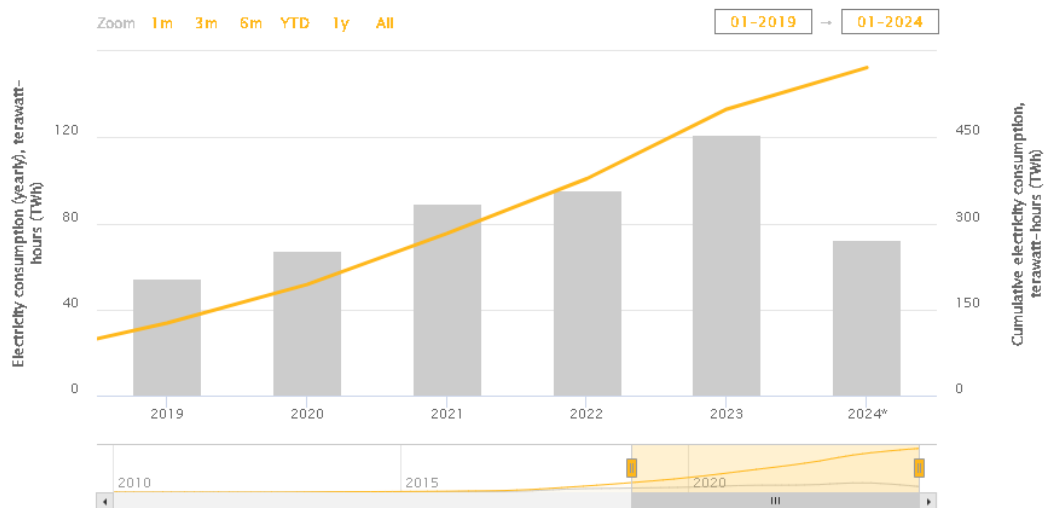


Figura 2. Consumo eléctrico total de bitcoin (CBECI,2024)

Introducción

La criptomoneda Bitcoin ha sido muy popular en los últimos años, pero su proceso de minado, esencial para validar y registrar transacciones en su cadena de bloques, ha sido criticado por su alto consumo energético e impacto ambiental. Este artículo evaluará críticamente el consumo energético y las emisiones de carbono asociadas al minado de Bitcoin, analizando su impacto ambiental desde una perspectiva dialéctica, con el objetivo de proponer soluciones más sostenibles.

El minado de Bitcoin es un proceso computacional complejo en el que los mineros compiten para resolver complejos problemas criptográficos y validar bloques de transacciones, siendo recompensados con nuevos bitcoins cuando tienen éxito (GAO, 2022). Este mecanismo conocido como prueba de trabajo (proof-of-work) requiere un poder computacional masivo y, por lo tanto, un consumo energético significativo, ya que los mineros utilizan software especializado para realizar cálculos matemáticos intensivos (SEC, 2021, Banco de la Reserva Federal de St. Louis, 2022).

Además, se examinarán alternativas más sostenibles como el uso de fuentes de energía renovables como la solar, eólica o hidroeléctrica para alimentar las operaciones de minado. Esto con el fin de mitigar el consumo excesivo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al minado de criptomonedas, buscando un equilibrio entre la innovación tecnológica y la sostenibilidad ambiental a largo plazo.

Marco teórico

La creciente demanda energética asociada a la minería de Bitcoin ha suscitado preocupaciones ambientales significativas. Según estimaciones para el año 2024 del Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI), mantenido por el Cambridge Centre for Alternative Finance (CCAF), el consumo energético del Bitcoin alcanzará los 146.82 TWh, con una eficiencia del hardware de minería de 26.43 J/TH. Estas cifras cobran relevancia al compararlas con la producción y el consumo mundial de electricidad y energía.

A nivel global, la producción mundial de electricidad se sitúa en 29,031 TWh, mientras que el consumo es de 25,530 TWh. En este contexto, el consumo de Bitcoin representa el 0.58%

del total. Por otro lado, la producción mundial de energía asciende a 175,892 TWh, y el consumo es de 169,624 TWh, donde el Bitcoin consume el 0.22% del total.

El impacto ambiental del Bitcoin no se limita al consumo energético. Se estima que las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la minería de Bitcoin alcanzarán las 74.39 MtCO₂e en 2024, lo que representa un aumento significativo en comparación con el año 2018, cuando se calculó que la red Bitcoin consumió 31.3 TWh de electricidad y generó 17.3 megatoneladas equivalentes de dióxido de carbono. Cabe destacar que, en 2018, alrededor del 99% del impacto ambiental provino del uso del equipo de minería, con contribuciones mínimas de la producción y el reciclaje (Köhler S, 2019).

El aumento en el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al Bitcoin podrían tener un impacto significativo en el medio ambiente. Un consumo elevado de electricidad, especialmente si proviene de fuentes no renovables, contribuye al agotamiento de recursos naturales y al calentamiento global. Además, las emisiones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero exacerban el cambio climático y sus efectos adversos, como el aumento de las temperaturas, la alteración de los patrones climáticos y la pérdida de biodiversidad. Por lo tanto, es crucial buscar soluciones para mitigar el impacto ambiental del Bitcoin, como el uso de energías renovables, la mejora de la eficiencia energética y la implementación de políticas y regulaciones adecuadas (Mora et al., 2018).

Además de las consideraciones ambientales, el costo de la minería de Bitcoin es un factor relevante. Según el Cambridge Centre for Alternative Finance (CCAF) de la Universidad de Cambridge, el costo estimado para minar un Bitcoin a mediados de 2023 era de aproximadamente \$17,000 USD. Esta cifra toma en cuenta diversos factores como los costos de electricidad, la eficiencia del hardware de minería y las condiciones económicas generales.

Metodología

Se realizó un análisis comparativo basado en la recopilación de datos secundarios de fuentes como el Índice de Consumo de Electricidad de Bitcoin de Cambridge (CBECI) y el Centro de Finanzas Alternativas de Cambridge (CCAF). De estas fuentes, se obtuvieron datos sobre

el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial, así como de las operaciones de Bitcoin. Además, se llevó a cabo una investigación exhaustiva para conocer la opinión actual sobre el impacto ambiental de la minería de Bitcoin, mediante la revisión de artículos académicos y publicaciones especializadas que abordaran tanto los aspectos positivos como negativos, permitiendo así un enfoque más amplio y objetivo.

Análisis del impacto ambiental

El consumo energético asociado a la minería de Bitcoin alcanzará los 146.82 TWh en 2024. Esta cifra cobra gran relevancia al compararla con la producción y el consumo mundial de electricidad y energía. A nivel global, la producción total de electricidad se sitúa en 29,031 TWh y el consumo en 25,530 TWh. En este contexto, el consumo eléctrico de Bitcoin representaría un 0.58% del consumo eléctrico mundial. Asimismo, la producción energética total mundial es de 175,892 TWh, mientras que el consumo alcanza los 169,624 TWh, donde el consumo energético de Bitcoin equivaldría al 0.22% del consumo energético global (CBECI, 2024).

Para dimensionar mejor estas cifras, el consumo energético de Bitcoin se ubicaría entre el de naciones como Pakistán (132.3 TWh anuales) y Ucrania (134.3 TWh anuales), superando ampliamente el consumo de estos países, pero siendo inferior al de otros como Malasia (150.8 TWh anuales) y Polonia (158.2 TWh anuales) (CBECI, 2024).

Cabe destacar que la energía utilizada por Bitcoin proviene de diversas fuentes, algunas de ellas altamente contaminantes. Según la figura 3, en 2022, el 36.55% procedía del carbón, el 24.97% del gas natural y el 0.89% del petróleo, sumando un 62.41% de fuentes fósiles. Por otro lado, el 11.3% provenía de la energía nuclear, el 14.87% de la energía hidroeléctrica, el 6.52% de la energía eólica, el 3.18% de la energía solar y el 1.72% de otras fuentes renovables (CBECI, 2024).

Bitcoin electricity consumption by source (yearly)

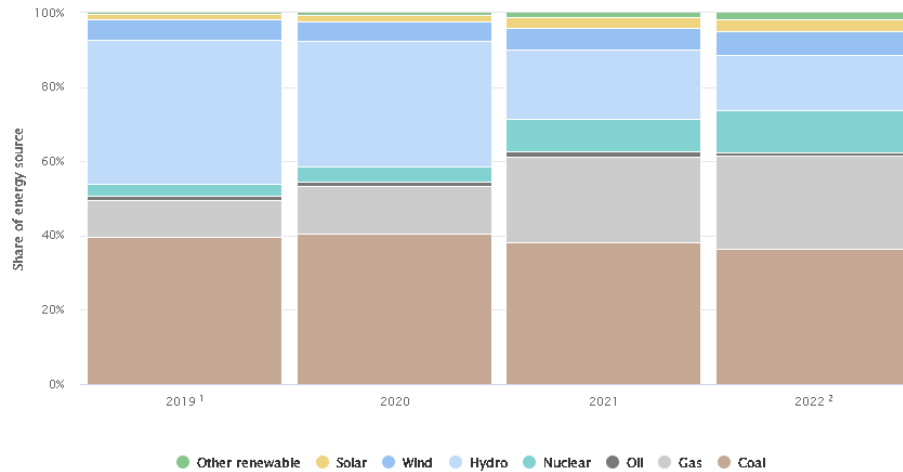


Figura 3. Consumo eléctrico de bitcoin por fuente anual periodo 2019 a 2022 (CBECI)

Estas fuentes energéticas se traducen en emisiones de gases de efecto invernadero. Como se muestra en la Figura 4, se estima que las emisiones asociadas a la minería de Bitcoin alcanzarán las 74.39 MtCO₂e en 2024, ubicándose en el puesto 67 a nivel mundial. Estas emisiones se situarían entre países como Kenia (73.4 MtCO₂e por año) y Nueva Zelanda (72.6 MtCO₂e por año), superando las emisiones de estos países, pero siendo inferiores a las de naciones como Grecia (79.9 MtCO₂e por año) y Rumania (78.4 MtCO₂e por año) (CBECI, 2024).

Greenhouse gas emissions: Countries close to Bitcoin

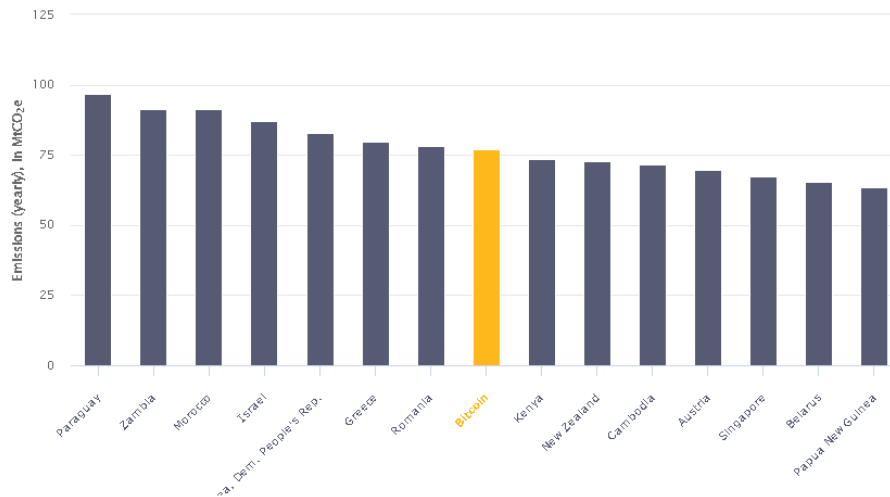


Figura 4. Países con emisiones de gases de efecto invernadero cercanos al bitcoin (CBECI)

El minado de Bitcoin presenta una serie de contradicciones fundamentales que ilustran la complejidad de esta actividad en el contexto económico y ambiental actual. Por un lado, genera ingresos significativos, convirtiéndose en una fuente importante de riqueza para muchos. Sin embargo, este beneficio económico viene acompañado de un alarmante costo ambiental (Mora et al., 2018).

Esta contradicción entre la generación de riqueza y el daño ambiental se ve exacerbada por el sistema de recompensas de Bitcoin, que incentiva fuertemente la minería con la promesa de ganancias sustanciales (Cambridge Centre for Alternative Finance, 2023). No obstante, este incentivo económico se contrapone directamente a la urgente necesidad global de reducir las emisiones de CO₂. La dependencia de energías no renovables resalta el conflicto entre los intereses económicos individuales y la responsabilidad colectiva de proteger el medio ambiente.

La creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de transitar hacia fuentes de energía más limpias ponen en tela de juicio la viabilidad a largo plazo de la minería de Bitcoin en su forma actual. Aunque existen esfuerzos para incorporar más energías renovables en el proceso de minería, como lo demuestra el 26.29% de energía proveniente de fuentes renovables, la escala del consumo energético sigue siendo un desafío importante (CBECI, 2024). La sostenibilidad a largo plazo de la minería de Bitcoin dependerá de cómo se aborde la contradicción entre mantener la rentabilidad y la seguridad de la red, mientras se reduce drásticamente su huella de carbono.

Resultados y discusión:

Los resultados de nuestra investigación indican que el minado de Bitcoin es un proceso intensivo en energía, con proyecciones que estiman un consumo energético de 146.82 TWh para 2024. Además, las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas se proyectan en 74.39 MtCO₂e para el mismo año (CBECI, 2024). Estos hallazgos sugieren un impacto

ambiental significativo y creciente, planteando preocupaciones sobre la sostenibilidad a largo plazo de esta tecnología. La dependencia de fuentes de energía no renovables, que constituyen el 62.41% de la energía utilizada en la minería de Bitcoin, exacerba aún más este problema (CBECI,2024).

Nuestros resultados están en línea con varios estudios previos, aunque existen algunas divergencias en cuanto a las perspectivas y soluciones propuestas. Chamanara et al. (2023) y Tayebi et al. (2024) coinciden con nuestros hallazgos sobre el alto impacto ambiental de la minería de Bitcoin. Chamanara et al. reportan un consumo de 173.42 TWh de electricidad durante 2020-2021, emitiendo más de 85.89 Mt de CO₂eq, mientras que Tayebi et al. comparan los daños climáticos de Bitcoin con los del petróleo crudo, sugiriendo que son insostenibles. Li et al. (2022) proyectan emisiones significativas de la minería de Bitcoin en China, alineándose con nuestras preocupaciones.

Sin embargo, otros estudios ofrecen perspectivas más equilibradas o proponen soluciones. Khatib et al. (2023) sugieren que la minería de Bitcoin basada en energías renovables podría contribuir a la descarbonización de las redes eléctricas, mientras que Choi et al. (2022) proponen que la combinación de hidrógeno verde y minería de Bitcoin podría acelerar la transición a energías renovables. Puig et al. (2023) contextualizan el impacto al comparar la eficiencia de carbono de la minería de Bitcoin con otras industrias.

En conclusión, nuestros resultados refuerzan la urgencia de acciones para mitigar el daño ambiental causado por la minería de Bitcoin, como lo sugieren Chamanara et al. (2023) y Tayebi et al. (2024). Sin embargo, también reconocemos la necesidad de explorar soluciones innovadoras y considerar el contexto más amplio de la industria, como lo proponen algunos de los estudios más recientes. El alto impacto energético del Bitcoin y su consecuente huella de carbono requieren una atención inmediata y acciones concretas para garantizar un futuro más sostenible para esta tecnología.

Conclusiones:

La presente investigación ha revelado que la minería de Bitcoin tiene un impacto ambiental significativo que requiere atención urgente y el desarrollo de alternativas más sostenibles. Los resultados obtenidos demuestran que el consumo energético asociado a esta actividad es alarmante, con proyecciones que indican un aumento continuo en los próximos años. Este escenario plantea un desafío crucial: encontrar un equilibrio que permita aprovechar los beneficios de esta tecnología innovadora sin comprometer el futuro del planeta.

Las implicaciones de este estudio son profundas y multifacéticas. Por un lado, subrayan la necesidad imperativa de una reevaluación crítica de los métodos de minería actuales, destacando la urgencia de un compromiso serio con la sostenibilidad ambiental en el sector de las criptomonedas (Cambridge Centre for Alternative Finance, 2023). Por otro lado, estos hallazgos sugieren la necesidad de un replanteamiento de las políticas energéticas y tecnológicas relacionadas con la blockchain, proponiendo una regulación más estricta y incentivos para la adopción de prácticas más ecológicas (Gürsoy et al., 2024).

En base a estos resultados, se proponen las siguientes recomendaciones: Primero, es crucial invertir en tecnologías de energía renovable para la minería de criptomonedas. Esto implica una reducción gradual de las fuentes de energía no renovables, sustituyéndolas por fuentes más amigables con el medio ambiente (Köhler, 2019). Segundo, se recomienda el desarrollo de tecnologías con un mayor tiempo de vida útil, para reemplazar los softwares más antiguos que consumen más recursos por los actuales, más eficientes. Tercero, y quizás lo más importante, se insta a una mayor inversión de recursos para mejorar estos aspectos, con el objetivo de hacer que la industria del Bitcoin sea sostenible a largo plazo.

En conclusión, aunque el Bitcoin y otras criptomonedas ofrecen innovaciones tecnológicas y financieras significativas, su impacto ambiental actual es insostenible. El camino hacia adelante requiere un esfuerzo concertado de todos los actores involucrados: mineros, desarrolladores, reguladores y consumidores. Es fundamental que trabajen juntos para mantener esta energía innovadora en uso, minimizando al mismo tiempo el daño ambiental (Mora et al., 2018).

Recomendaciones para Mitigar el Impacto Ambiental:

Para mitigar el impacto ambiental del minado de Bitcoin, se recomienda implementar una serie de medidas que abarquen tecnologías sostenibles, métodos de reducción de emisiones y políticas públicas efectivas. En cuanto a tecnologías sostenibles, se propone un mayor uso de energías renovables, principalmente eólica, hidráulica y solar. Esta transición hacia fuentes de energía limpia debe ser gradual pero constante, estableciendo objetivos claros de reducción de emisiones con hitos específicos a corto, mediano y largo plazo (Cambridge Judge Business School, 2023).

Paralelamente, se sugiere la investigación y desarrollo de hardware de minado más eficiente energéticamente. Como medida transitoria, se recomienda la implementación de sistemas de captura y almacenamiento de carbono en las instalaciones que aún dependan de combustibles fósiles (Jones et al, 2022).

En el ámbito de las políticas públicas, se propone la introducción de impuestos sobre el carbono para las operaciones de minado que utilicen fuentes de energía no renovables, combinados con subsidios y beneficios fiscales para aquellas que empleen energía verde. Estas medidas deben ir acompañadas de un marco regulatorio que exija transparencia en el consumo energético y las emisiones, permitiendo a consumidores e inversores tomar decisiones informadas.

Finalmente, se sugiere la colaboración internacional para establecer estándares globales de sostenibilidad en la industria del minado de criptomonedas, asegurando un enfoque coherente y efectivo a nivel mundial para abordar este desafío ambiental.

Limitaciones del Estudio sobre la Minería de Bitcoin y su Impacto Ambiental

El presente estudio sobre la minería de Bitcoin y su impacto ambiental enfrentó varias limitaciones significativas que es importante reconocer. En cuanto a las restricciones metodológicas, la principal dificultad fue la falta de datos precisos sobre las emisiones de CO₂ y el consumo energético real asociados a las operaciones de minería (Cambridge Centre for Alternative Finance, 2023). Es crucial destacar que nuestro análisis se basó principalmente en estimaciones de datos, lo que introduce un nivel inherente de

incertidumbre en los resultados. Además, el estudio no abarcó todas las actividades relacionadas con la minería de criptomonedas.

Específicamente, no se analizó el impacto ambiental de la producción de los softwares utilizados en el proceso de minería, ni se consideraron las consecuencias ecológicas del desecho de los equipos de minería obsoletos. Estas áreas no abordadas representan aspectos importantes del ciclo de vida completo de la minería de criptomonedas que podrían tener implicaciones ambientales significativas (Ghosh & Bouri, 2022).

En cuanto a las fuentes potenciales de error, el uso exclusivo de estimaciones y la falta de mediciones directas y exhaustivas pueden haber llevado a subestimaciones o sobreestimaciones en los cálculos de emisiones y consumo energético. Asimismo, la variabilidad en la eficiencia de los diferentes equipos de minería y la dificultad para obtener datos representativos de todas las operaciones a nivel mundial introducen un grado adicional de incertidumbre en las proyecciones y conclusiones del estudio (Shangrong et al., 2021).

Estas limitaciones subrayan la necesidad de estudios futuros que puedan proporcionar datos más precisos y abarquen todos los aspectos del ciclo de vida de la minería de criptomonedas para evaluar de manera más completa su impacto ambiental.

Futuras líneas de Investigación

Las futuras líneas de investigación en el campo de la minería de Bitcoin y su impacto ambiental son vastas y prometedoras. En términos de innovaciones tecnológicas, es urgente el desarrollo de nuevos softwares que no solo optimicen la eficiencia energética del minado, sino que también tengan un tiempo de vida más largo (Chamanara et al., 2023). Esta longevidad del software es crucial para reducir la necesidad de actualizaciones frecuentes, disminuyendo así tanto el consumo de recursos como la generación de residuos digitales (Gürsoy et al., 2024).

Paralelamente, se necesitan estudios longitudinales exhaustivos que evalúen el impacto a largo plazo de la implementación de energías renovables en esta industria (Ibañez & Freier, 2023; Jabłczyńska et al., 2023). Estos estudios podrían revelar patrones y tendencias cruciales para la sostenibilidad del sector.

Es fundamental reconocer que estas investigaciones trascienden los límites de una sola disciplina. La naturaleza multidisciplinaria de este campo requiere colaboraciones entre expertos en informática, ingeniería energética, economía y ciencias ambientales, entre otros (Tomatsu & Han, 2023). Esta diversidad de perspectivas no solo enriquece la investigación, sino que también amplía el alcance y la profundidad de las soluciones propuestas.

Incentivamos encarecidamente a la comunidad científica y tecnológica a abordar estos desafíos, con el objetivo de forjar un futuro más sostenible para la industria de las criptomonedas.

Referencias

1. Cambridge Blockchain Network Sustainability Index: CBECL. (2024). Recuperado de <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci>
2. Köhler S (2019). Life Cycle Assessment of Bitcoin Mining, Environmental Science & Technology
3. U.S. Government Accountability Office GAO . (2022). Science & Tech Spotlight: Blockchain & Distributed Ledger Technologies.
4. U.S. Securities and Exchange Commission SEC. (2021). Investor Bulletin: Exchange-Traded Funds (ETFs)
5. Federal Reserve Bank of St. Louis. (2022). What is Bitcoin Mining? Open Vault Blog
6. U.S Securities and Exchange Commission SEC (2021). Funds Trading in Bitcoin Futures – Investor Bulletin
7. Cambridge Judge Business School. (2023). Bitcoin electricity consumption: an improved assessment. News & insight.
8. Tayebi, S., & Amini, H. (2024). The flip side of the coin: Exploring the environmental and health impacts of proof-of-work cryptocurrency mining. Environmental Research, 118798.
9. Gürsoy, S., Józwiak, B., Dogan, M., Zeren, F., & Gulcan, N. (2024). Impact of Climate Policy Uncertainty, Clean Energy Index, and Carbon Emission Allowance Prices on Bitcoin Returns. Sustainability, 16(9), 3822.

10. Lal, A., & You, F. (2024). Climate sustainability through a dynamic duo: Green hydrogen and crypto driving energy transition and decarbonization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(14), e231391121.
11. Chamanara, S., Arman Ghaffarizadeh, S., & Madani, K. (2023). The environmental footprint of bitcoin mining across the globe: Call for urgent action. *Earth's Future*, 11(10)
12. Ibañez, J. I., & Freier, A. (2023). Bitcoin's carbon footprint revisited: Proof of work mining for renewable energy expansion. *Challenges*, 14(3), 35.
13. Tomatsu, Y., & Han, W. (2023). Bitcoin and renewable energy mining: A survey. *Blockchains*, 1(2), 90.
14. Ibañez, J. I., & Freier, A. (2023). Don't trust, verify: Towards a framework for the greening of bitcoin
15. Hallinan, K. P., Lu, H., Mulford, R., Bower, L., Russell, K., Austin, M., & Schroeder, A. (2023). Review and demonstration of the potential of bitcoin mining as a productive use of energy (PUE) to aid equitable investment in solar micro- and mini-grids worldwide. *Energies*,.
16. Jones, B. A., Goodkind, A. L., & Berrens, R. P. (2022). Economic estimation of bitcoin mining's climate damages demonstrates closer resemblance to digital crude than digital gold. *Scientific Reports (Nature Publisher Group)*.
17. Bondarev, M. (2020). Energy consumption of bitcoin mining. *International Journal of Energy Economics and Policy*.
18. Shangrong, J., Yuze, L., Quanying, L., Yongmiao, H., Dabo, G., Xiong, Y., & Shouyang, W. (2021). Policy assessments for the carbon emission flows and sustainability of bitcoin blockchain operation in china. *Nature Communications*.
19. Huang, J., O'Neill, C., & Tabuchi, H. (2021). Bitcoin uses more electricity than many countries. how is that possible?: [Business/Financial desk]. *New York Time*
20. Rudd, M. A., Bratcher, L., Collins, S., Branscum, D., Carson, M., Connell, S., Porter, D. (2023). Bitcoin and its energy, environmental, and social impacts: An assessment of key research needs in the mining sector. *Challenges*.

21. Jabłczyńska, M., Kosc, K., Ryś, P., Sakowski, P., Ślepaczuk, R., & Zakrzewski, G. (2023). Energy and cost efficiency of bitcoin mining endeavor.
22. Haq, I. U., Maneengam, A., Chupradit, S., & Huo, C. (2023). Are green bonds and sustainable cryptocurrencies truly sustainable? evidence from a wavelet coherence analysis: Znanstveno-strucni casopis. Ekonomska Istrazivanja.
23. Ghosh, B., & Bouri, E. (2022). Is Bitcoin's carbon footprint persistent? multifractal evidence and policy implications. Entropy.
24. Alshahrani, H., Islam, N., Syed, D., Sulaiman, A., Mana Saleh, A. R., Rajab, K., . . . Soomro, A. (2023). Sustainability in blockchain: A systematic literature review on scalability and power consumption issues. Energies, 16(3), 1510.
25. Mora, C., Rollins, R. L., Taladay, K., Kantar, M. B., Chock, M. K., Shimada, M., & Franklin, E. C. (2018/11//). Bitcoin emissions alone could push global warming above 2°C. Nature Climate Change, 8(11), 931-933.