



# UNIVERSITÀ DEL SALENTO

Dipartimento di Scienze dell'Economia

Corso di Laurea in Economia e Finanza, indirizzo Finanziario (L33)

---

## *Tesi di Laurea in Econometria*

**Bitcoin ed energia: verso l'efficienza e  
la sostenibilità ambientale.**

**Bitcoin and energy: towards efficiency  
and environmental sustainability.**

**RELATORE:**

*Ch.mo Prof. Pierluigi Toma*

**DOTTORE:**

*Jacopo Graziuso*

---

Tesi aggiornata al 3 marzo 2025

© Dott. Jacopo Graziuso, 2024. Tutti i diritti riservati.

È vietata la riproduzione, anche parziale, dell'opera con qualsiasi mezzo, compresi la copia digitale e la diffusione su internet, senza autorizzazione scritta dell'autore. La presente tesi è protetta ai sensi della Legge sul Diritto d'Autore (L. 633/1941) e successive modifiche. Questa tesi è distribuita con Licenza Creative Commons Attribuzione - Non Commerciale - Non opere derivate 4.0 Internazionale (CC BY-NC-ND 4.0). I termini completi di seguito:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.it>

Bitcoin timestamp, consegna in archivio accademico (03/03/2025, 17:49):

- Numero blocco: #886164
- Hash blocco:  
000000000000000000000000022b91ab2fe0d882b6bc365bfe867cefa87ef2df34432a
- <https://mempool.space/it/block/000000000000000000000000022b91ab2fe0d882b6bc365bfe867cefa87ef2df34432a>

Tutti i contatti: <https://linktr.ee/JacopoGrazioso>

*«Se non ci credete o non lo capite, non ho il tempo di cercare di convincervi,  
mi dispiace.»*

Satoshi Nakamoto

*«La natura di Bitcoin è tale che, dopo aver rilasciato la prima versione, i principi  
del protocollo sono immutabili per l'eternità.»*

Satoshi Nakamoto

*«Il problema oggi non è l'energia nucleare, ma il cuore dell'uomo.»*

Albert Einstein

*«Una centrale nucleare è infinitamente più sicura che mangiare, dato che  
300 persone ogni anno vengono soffocate a morte dal cibo.»*

Dixy Lee Ray

***Ai miei nonni***

## Indice

---

<b>Introduzione</b>	<b>4</b>
<b>1. Uno sguardo alla letteratura esistente</b>	<b>8</b>
1.1 Bitcoin	9
1.2 Energia nucleare	21
1.3 Bitcoin ed energia nucleare	34
1.4 Casi studio nel mondo	37
<b>2. Modello economico</b>	<b>46</b>
2.1 Variabili e assunzioni del modello	47
2.2 Una prima analisi	52
2.3 L'evolversi delle variabili	64
<b>3. Modello econometrico</b>	<b>73</b>
3.1 Modelli di regressione	73
3.2 Modelli panel	88
<b>Conclusioni, criticità, prospettive</b>	<b>96</b>
<b>Bibliografia e sitografia</b>	<b>104</b>

## Introduzione

---

Negli ultimi anni, il mondo ha assistito ad una crescente attenzione verso la sostenibilità ambientale e l'efficienza energetica, temi diventati centrali nelle agende politiche, economiche e sociali a livello globale. In questo contesto, due tecnologie apparentemente distanti, Bitcoin<sup>1</sup> e l'energia nucleare, emergono come protagoniste di un possibile cambiamento di paradigma. Quale modo migliore per comprendere l'argomento centrale del seguente studio se non partendo da un'analisi del titolo: “Bitcoin ed energia: verso l'efficienza e la sostenibilità ambientale”.

**Bitcoin.** Il concetto di questo rivoluzionario bene sociale nasce il 31 ottobre 2008 quando Satoshi Nakamoto<sup>2</sup> rende pubblico, tramite una *mailing list*, il *whitepaper* di Bitcoin, dal titolo: “*Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*”, ovvero “Bitcoin: un sistema di moneta elettronica peer-to-peer”. L'avvio ufficiale di Bitcoin avviene il 3 gennaio 2009, con la creazione del primo blocco della *timechain*, il *Genesis Block*, contenente i primi 50 BTC e un messaggio destinato a passare alla storia: “*The Times 03/Jan/2009 Chancellor on brink of second bailout for banks*” (“Il cancelliere sull'orlo del secondo salvataggio delle banche”)<sup>3</sup>. Questo messaggio, oltre a essere una prova della data di creazione del blocco, rappresenta un implicito commento all'instabilità del sistema bancario tradizionale basato sulla riserva frazionaria<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> Si rende noto che con “*Bitcoin*” si intende l'intero ecosistema (protocollo informatico, *software opensource* ecc.), mentre con “*bitcoin*” si indicano le monete virtuali (21 milioni al massimo con le quali si interagisce nella *Timechain*), la cui etichetta è “*BTC*”.

<sup>2</sup> Pseudonimo dell'ideatore e creatore di Bitcoin. Tutt'oggi non è nota la sua identità, se sia una singola persona o un gruppo di programmatori rivoluzionari. In ogni caso, egli era un Cypherpunk.

<sup>3</sup> In realtà la storia di Bitcoin inizia molto prima, nel 1933. Per approfondire il tema si consiglia l'ascolto delle prime 7 puntate del podcast “*Il Priorato del Bitcoin*” a cura di Turtlecute e G. Zucco (2022), disponibile a: <https://priorato.org/>, o la lettura inerente a cura di Musclesatz disponibile a: <https://www.musclesatz.com/it/>.

<sup>4</sup> Si rammenta che la nascita di Bitcoin non avviene in un periodo economico-finanziario “felice”, ma in piena crisi finanziaria globale, tra il 2007 e il 2009. Per un approfondimento si consulti la pagina web Consob “*La crisi finanziaria del 2007-2009*”: <https://www.consob.it/web/investor-education/crisi-finanziaria-del-2007-2009>.

Da allora, Bitcoin ha assunto una posizione centrale nel dibattito su innovazione, decentralizzazione e libertà finanziaria, sfidando i sistemi monetari tradizionali e divenendo non solo uno strumento economico, ma anche un fenomeno culturale e tecnologico, introducendo un nuovo modello di utilizzo delle risorse computazionali: il *mining*. Questo studio non si limiterà ad analizzarne l'impatto economico-finanziario, ma si concentrerà su due dimensioni spesso trascurate: la sostenibilità ambientale e il suo potenziale sociale.

**Energia.** L'energia a cui si farà maggiormente riferimento è quella nucleare, che per decenni è stata oggetto di dibattiti accesi e controversie, ma il suo ruolo nella transizione energetica globale è oggi più rilevante che mai. Con la ratifica dell'Accordo di Parigi e gli obiettivi del *Green Deal* europeo, il nucleare è stato riconosciuto come una delle fonti energetiche chiave per ridurre le emissioni di gas serra e garantire un sistema elettrico stabile e affidabile. Tuttavia, questioni legate alla sicurezza, ai costi di costruzione degli impianti e alla gestione delle scorie continuano a sollevare interrogativi sulla sua effettiva sostenibilità. Nonostante queste sfide, il nucleare è riconosciuto da molte istituzioni, tra cui l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), come una componente essenziale del mix energetico futuro. A differenza delle fonti rinnovabili come l'eolico e il solare, la cui produzione dipende da fattori atmosferici, l'energia nucleare offre una capacità costante e prevedibile, con emissioni di CO<sub>2</sub> quasi nulle durante il funzionamento. In questo contesto, le nuove tecnologie rappresentano una promettente evoluzione, offrendo maggiore flessibilità, sicurezza e sostenibilità economica e ambientale rispetto ai reattori tradizionali. Tuttavia, permangono sfide legate alla gestione delle scorie radioattive e ai costi iniziali di costruzione, che richiedono un impegno internazionale per lo sviluppo di soluzioni innovative.

**Efficienza e sostenibilità ambientale.** La crescente consapevolezza dei cambiamenti climatici ha spinto governi, aziende e cittadini a rivalutare il modo in cui produciamo e consumiamo energia. In questo scenario, concetti come efficienza energetica e sostenibilità ambientale non sono più opzioni, ma necessità imprescindibili.

Bitcoin è spesso criticato per il suo elevato consumo energetico. Tuttavia, il mining sta gradualmente dimostrando la sua possibilità di evolversi verso modelli più sostenibili, grazie all'adozione di energie rinnovabili e all'uso di risorse energetiche inutilizzate. D'altra parte, l'energia nucleare, tradizionalmente associata a immagini di rischio e complessità, si presenta oggi come una delle soluzioni più efficaci e sicure per decarbonizzare il settore energetico, integrandosi perfettamente con le fonti rinnovabili per garantire una transizione sostenibile.

**Aspettative.** L'ipotesi centrale di questa tesi è che Bitcoin e l'energia nucleare possano non solo coesistere, ma anche rafforzarsi reciprocamente in un'ottica di sostenibilità ambientale ed efficienza energetica. La logica alla base di questa sinergia è semplice ma potente: il mining di Bitcoin può essere utilizzato per ottimizzare l'uso delle risorse energetiche, sfruttando *surplus* di energia altrimenti inutilizzati o contribuendo a stabilizzare reti elettriche in aree con una produzione intermittente. Attraverso un'analisi oggettiva, multidimensionale e multidisciplinare, si cercherà di mettere in luce come queste due tecnologie, apparentemente distanti, possano contribuire, insieme, a costruire un futuro energetico più equo e sostenibile.

Proseguendo nella lettura di questa tesi, si incontreranno tre capitoli ricchi di dati analizzati e commentati, validati da fonti solide e autorevoli. Nello specifico, la struttura sarà la seguente:

1. Capitolo 1: si propone un'analisi della letteratura esistente in tema di Bitcoin ed energia nucleare, arricchita da dati tratti da *paper* scientifici, grafici e tabelle, di cui si commentano i risultati. Questo capitolo introduttivo ha l'obiettivo di far luce sull'argomento, evidenziandone rischi e benefici, vantaggi e svantaggi, e ponendo le basi per l'analisi condotta nei due capitoli successivi. Costituisce, inoltre, un supporto metodologico per la scelta delle variabili che verranno impiegate nell'analisi successiva, un bagaglio culturale che accompagnerà il lettore per tutto l'elaborato.

2. Capitolo 2: dopo aver illustrato e motivato le variabili selezionate, che accompagneranno il lettore sino ai passaggi conclusivi della tesi, si condurranno le prime analisi e conclusioni del caso, facendo luce su alcuni problemi incontrati lungo il cammino, poi risolti grazie all'analisi condotta nel capitolo successivo.
3. Capitolo 3: in questo capitolo si procede con l'analisi econometrica vera e propria, utilizzando diversi modelli volti a individuare le cause delle emissioni di gas inquinanti e a delineare potenziali soluzioni per contrastare, o almeno mitigare, il dilagante inquinamento. Quest'ultimo è responsabile di molteplici effetti negativi, tra cui il più rilevante, il cambiamento climatico: se non adeguatamente contenuto, rischia di produrre conseguenze disastrose e incalcolabili per l'intero ecosistema mondiale.

Infine, si precisa che questo lavoro non è un paper su come funziona Bitcoin tecnologicamente o finanziariamente, del processo fisico dietro alla fissione nucleare, all'inquinamento in senso biologico o alla loro storia, ma piuttosto un'analisi econometrica sull'impatto che queste tecnologie hanno a livello ambientale ed energetico.



## 1. Uno sguardo alla letteratura esistente

---

Il secondo passo, fondamentale per comprendere il messaggio del presente elaborato, consiste nell'analisi di studi esistenti in argomento. Per semplicità di lettura questo capitolo è suddiviso in quattro sezioni:

1. Bitcoin: parte dedicata ad un'analisi degli studi sull'inquinamento e sul consumo energetico del mining di Bitcoin e ciò che ne comporta, e non solo;
2. energia nucleare: sezione destinata allo studio della letteratura inerente all'energia nucleare come la fonte di energia più pulita, economica e sicura esistente, capace di iniziare il processo tanto discusso di decarbonizzazione;
3. Bitcoin ed energia nucleare: terza parte dedicata all'integrazione dei due temi principali del seguente studio: l'energia nucleare usata come fonte di alimentazione del mining di Bitcoin per ottenere valore (scarsità digitale) ed energia a bassissimo impatto ambientale, sostenibile, efficiente e resiliente;
4. casi studio nel mondo: sezione pratica nella quale si cercano di analizzare dei casi studio pratici inerenti a progetti concreti a supporto delle tesi avanzate nel seguente elaborato, capendo con esempi reali da tutto il mondo i benefici apportati da Bitcoin e dall'energia nucleare.

Pertanto, sono stati selezionati meticolosamente numerosi studi, articoli, ricerche, tesi, libri, paper e dati (si vedano bibliografia e sitografia) inerenti a Bitcoin ed energia nucleare.

## 1.1 Bitcoin

---

Bitcoin, il principale *cryptoasset*<sup>5</sup> al mondo ha suscitato notevole interesse sia per le sue implicazioni economico-finanziarie che per il suo impatto ambientale. L'aumento esponenziale del valore di mercato del bitcoin ha incentivato l'espansione delle attività di mining, determinando un significativo aumento del consumo energetico e delle emissioni di CO<sub>2</sub> associate. Tuttavia, recenti studi suggeriscono che l'impatto ambientale di Bitcoin potrebbe essere inferiore a quanto si pensi, e che il bene può avere benefici sociali rilevanti e resilienti.

**Mining e miner.** Prima di affrontare il discorso sull'inquinamento, sui consumi energetici di Bitcoin e le conseguenze ambientali, sociali ed economiche, è necessaria una digressione sul mining, *miner* e su come l'ecosistema di questo bene rivoluzionario funzioni. Il mining di Bitcoin è il processo mediante il quale vengono convalidati e aggiunti nuovi blocchi di transazioni alla timechain di Bitcoin, un registro pubblico e distribuito che funge da base del sistema monetario del bitcoin. Parallelamente, il mining è anche il meccanismo attraverso il quale vengono creati nuovi bitcoin, fornendo un incentivo economico ai partecipanti (noti come miner) che investono risorse nel mantenimento e nella sicurezza della rete. La timechain di Bitcoin è un registro pubblico, paragonabile ad una catena di blocchi (da qui *blockchain*), in cui ogni blocco contiene un elenco di transazioni verificate. Per aggiungere un nuovo blocco alla catena, i miner competono per risolvere un complesso “puzzle crittografico”, basato sull'algoritmo di consenso noto come *Proof of Work*<sup>6</sup> (PoW).

---

<sup>5</sup> La denominazione di questo tipo di tecnologie da “*cryptovalute*” a “*cryptoasset*” è stata proposta nel 2019 dalla BCE e si preferisce questo per vari motivi. Il principale sta nel fatto che di “valute” le tecnologie citate non ne hanno i fondamenti, fuorché Bitcoin, ma non è questa la sede. Per un approfondimento si vedano: “*The Bitcoin Standard*” (di S. Ammous), “*Mastering Bitcoin*” (di A. M. Antonopoulos) e “*Mastering Lightning Network*” (di A. M. Antonopoulos, O. Osuntokun & R. Pickhardt).

<sup>6</sup> In breve, il PoW garantisce la sicurezza della rete rendendo proibitivamente costoso alterare i dati, poiché per riscrivere un blocco sarebbe necessario rifare il lavoro per tutti i blocchi precedenti. Nel PoW, i miner competono per risolvere un complesso problema matematico generato dal sistema, che richiede ingenti risorse computazionali.

Bitcoin è immutabile, trasparente, sicuro e distribuito, grazie al concatenamento dei blocchi della sua timechain. Infatti, ogni blocco contiene l'*hash*<sup>7</sup> del blocco precedente, rendendo praticamente impossibile modificare la catena a piacimento. I **miner** sono individui o aziende che utilizzano *hardware* specializzato, come gli ASIC<sup>8</sup>, per risolvere i puzzle matematici richiesti dal PoW. La loro funzione principale è quella di confermare le transazioni mentendo sicura la rete, aggiungendo nuovi blocchi. I miner ricevono una ricompensa per il loro lavoro, ossia confermare l'assenza di doppie transazioni garantendo l'unicità di spesa (operazione impensabile digitalmente senza la presenza di un intermediario tra le due controparti che si scambiano valore prima del PoW di Bitcoin)<sup>9</sup>. Queste operazioni generano nuovi BTC (i cd. *block reward*) che costituiscono il vero e proprio incentivo economico per partecipare al mining. Questa ricompensa si dimezza ogni 210.000 blocchi (circa ogni quattro anni) in un evento noto come *halving*, riducendo gradualmente il tasso di creazione di nuovi bitcoin e rendendo antinflazionistico il sistema. Inoltre, i miner ricevono anche le *fees* associate alle transazioni incluse nel blocco, ossia delle basse commissioni per ogni transazione convalidata. Infine, è utile specificare che la rete di Bitcoin si autoregola ogni 2.016 blocchi al fine di garantire che il tempo medio necessario per trovare un nuovo blocco resti vicino a 10 minuti. Questo meccanismo, noto come *difficulty adjustment*, assicura che l'emissione di nuovi bitcoin sia costante e prevedibile nel tempo, rendendo di conseguenza calcolabile la sua inflazione.

---

<sup>7</sup> L'hash di un blocco è un identificatore unico generato mediante un algoritmo crittografico (lo SHA-256) che rappresenta i dati contenuti nel blocco in modo compatto e sicuro. È una stringa alfanumerica di lunghezza fissa che serve a garantire l'integrità e la sicurezza della blockchain.

<sup>8</sup> Gli ASIC (*Application-Specific Integrated Circuits*) sono dei computer creati ad hoc per il mining di Bitcoin, progettati esclusivamente per svolgere un compito specifico, in questo caso l'elaborazione degli algoritmi di *hashing* richiesti dal protocollo Bitcoin. Questi dispositivi riducono il consumo energetico rispetto ai primi dispositivi usati per il mining, ossia computer con CPU e GPU stressati per esso.

<sup>9</sup> Si presti attenzione a non confondere i miner con gli intermediari finanziari, poiché i primi possono essere rappresentati da qualsiasi entità con un computer ed una connessione ad Internet, per i secondi vi è un ente centrale (spesso le Banche Centrali) che decide se possono essere tali e che li regola e controlla. Il network Bitcoin, essendo distribuito, si autoregola ed autocontrolla poiché tutti i partecipanti hanno incentivo a farlo e la stessa voce in capitolo, qualsiasi sia la loro entità.

I vantaggi portati dal mining<sup>10</sup> sono diversi, ma i due principali sono:

1. può essere svolto in luoghi remoti dove c'è abbondanza di energia rinnovabile ma poca possibilità di utilizzo locale. Le *mining farm*<sup>11</sup>, composte spesso da container mobili, possono essere facilmente posizionate dove serve;
2. è altamente flessibile, cioè i miner possono modulare le loro macchine in pochi minuti adattandosi perfettamente all'offerta e alla domanda di energia, sia spostando facilmente l'intera mining farm e sia modulando la quantità di energia utilizzata. Questo permette di potenziare le centrali rinnovabili che in passato dovevano essere sottodimensionate rispetto ai picchi di domanda. Basti pensare che durante la notte, nonostante le centrali idroelettriche ed eoliche possano continuare a produrre, si è economicamente portati a tenerle quasi totalmente ferme data l'assenza di richiesta. Bitcoin risolve questi problemi.

Nonostante i molti benefici, la rivoluzione tecnologia che ha portato conseguentemente alla creazione di scarsità digitale prima impensabile, il mining resta comunque un processo energivoro. La necessità di risolvere complessi calcoli matematici richiede grandi quantità di elettricità, che dipendono dall'hardware utilizzato e dal costo dell'energia locale. Questa caratteristica ha portato a numerosi dibattiti sulla sostenibilità ambientale del mining.

**Regolamentazione.** Numerosi studi sottolineano la necessità di regolamentare le attività di mining per ridurre l'impatto ambientale<sup>12</sup>.

---

<sup>10</sup> Il discorso appena affrontato è in linea con quanto osservato nel paper scientifico di J. I. Ibanez & A. Freier, "*Bitcoin's Carbon Footprint Revisited: Proof of Work Mining for Renewable Energy Expansion*" (2023), arxiv (Cornell University).

<sup>11</sup> Molti ASIC sono messi insieme in dei container facilmente trasportabili su strada tramite camion, in modo da localizzarsi laddove c'è necessità. Pertanto, le mining farm possono essere di piccole dimensioni consumando quanto un'abitazione, cioè 2-3 kWh, ma anche di dimensioni più importanti, in alcuni casi andando a comparare anche degli impianti industriali.

<sup>12</sup> Oggigiorno vi sono già molte norme che regolano il funzionamento dei cryptoasset. Nell'UE è presente il MiCAR (*Markets in Crypto-Asset Regulation*) atto a proteggere gli investitori e garantire stabilità finanziaria; negli States vi è la SEC (*Security and Exchange Commission*) che regola gli asset digitali come Bitcoin coordinandosi anche con la CFTC (*Commodity Futures Trading Commission*) e integrandosi con la FinCEN (*Financial Crimes Enforcement Network*); la Svizzera regola attraverso l'autorità di vigilanza FINMA (*Financial Market Supervisory Authority*); Singapore attraverso la MAS (Autorità Monetaria di Singapore); l'Italia attraverso la CONSOB (Commissione Nazionale per la Società e la Borsa).

Tra le misure proposte figurano l'imposizione di tasse sul carbonio, la limitazione dell'accesso ai mercati energetici per i miner inefficienti e la regolamentazione dei siti di mining. Un'analisi econometrica ha inoltre evidenziato come queste regolamentazioni possano mitigare gli effetti negativi della correlazione tra il prezzo del bitcoin e il consumo energetico. Il “*Crypto Climate Accord*” è un'iniziativa, che coinvolge oltre 250 aziende miner, che mira a supportare lo sviluppo di cryptoasset sostenibili con l'obiettivo di raggiungere la neutralità carbonica entro il 2030. La riduzione dell'impronta di carbonio<sup>13</sup> dipenderà fortemente dalla transizione delle reti energetiche nazionali verso la neutralità carbonica, che molti esperti prevedono possa verificarsi intorno al 2050, con un picco di emissioni intermedio. Queste proposte mirano a incentivare l'adozione di energia rinnovabile e a minimizzare le emissioni nelle aree con una rete energetica basata sui combustibili fossili.

**Rapporto prezzo-energia.** Il prezzo del bitcoin è direttamente correlato al consumo energetico: un aumento del valore di mercato incentiva un maggior numero di miner a competere, portando a incrementi nel difficulty adjustment delle attività di mining e nel consumo elettrico della rete. Questo effetto è evidente nei dati relativi all'*hashrate*<sup>14</sup> e alla difficoltà del mining. L'effetto di *spillover*<sup>15</sup> causato dall'aumento dell'*hashrate* influenza sia il prezzo che il costo ambientale del mining. I miner tendono a ritirarsi quando i costi energetici superano i benefici economici, creando un effetto di autoregolazione. Tuttavia, studi dimostrano che questo adattamento non è sufficiente a bilanciare l'impatto ecologico nei periodi di aumento di valore e domanda di Bitcoin. Alcuni ricercatori sostengono che le critiche sulle emissioni inquinanti non tengano conto del valore economico del bene rispetto al suo impatto ambientale.

---

<sup>13</sup> Come osservato dal paper scientifico di M. Saqlain, V. Simic & D. Pamucar, “*Evaluation of Carbon Footprints Associated with Cryptocurrency Mining using q-Rung Orthopair Fuzzy Hypersoft Sets*” (2024), ResearchGate.

<sup>14</sup> L'*hashrate* rappresenta la capacità complessiva della rete di Bitcoin nel risolvere calcoli crittografici per il mining ed è misurato in hash al secondo (H/s).

<sup>15</sup> L'effetto *spillover* è un fenomeno economico in cui l'azione o il cambiamento in un settore o in un'area geografica influenza altri settori o aree. Nel caso specifico, descrive come l'aumento del prezzo del bitcoin possa influire non solo sul consumo energetico, ma anche sui costi di rete e sulle emissioni globali, con effetti indiretti sui mercati energetici.

In aggiunta, diversi autori<sup>16</sup> ipotizzano che l'introduzione di hardware più efficiente e l'abbandono di impianti di mining meno redditizi possano portare a una riduzione della sua impronta carbonica nel tempo. Il mining di Bitcoin può contribuire alla sostenibilità incentivando l'uso di energie rinnovabili e stabilizzando le reti elettriche globali. Si pensi a progetti come “*Gridless*” che dimostrano il potenziale del mining di diventare “*carbon neutral*” o persino “*carbon negative*”<sup>17</sup>, sfruttando risorse energetiche inutilizzate, come l'energia idroelettrica in eccesso o il gas proveniente dai processi di estrazione di petrolio<sup>18</sup>.

**Bitcoin nel mondo.** La sostenibilità di Bitcoin<sup>19</sup> è quindi vista in una prospettiva innovativa, dove le aziende sfruttano risorse energetiche locali in modo efficiente, riducendo sia il costo energetico sia l'impatto ambientale globale. Infatti, Paesi come India, Brasile, Stati Uniti, Germania, Portogallo e Sud Africa guidano il settore grazie a normative favorevoli, mentre economie a medio reddito, come Vietnam, Nigeria, Filippine, El Salvador e Argentina, sfruttano il bitcoin come alternativa finanziaria in contesti con infrastrutture bancarie limitate. Questi Stati dimostrano l'importanza di Bitcoin come strumento di riserva di valore e facilitazione economica in ambienti con infrastrutture finanziarie tradizionali scarse. In assenza di regolamentazioni, il mining di Bitcoin tende a migrare verso regioni con mix energetici più inquinanti, un fenomeno noto come “*carbon leakage*”. Ad esempio, un divieto in Canada potrebbe spostare le operazioni verso paesi con infrastrutture basate su combustibili fossili, causando un aumento netto delle emissioni globali. In varie regioni, come Manitoba e New York, le moratorie sul mining sono accompagnate da preoccupazioni per l'impatto sul mercato energetico e sulle emissioni di carbonio. Tali misure riflettono il tentativo di bilanciare l'adozione tecnologica con la sostenibilità ambientale.

---

<sup>16</sup> Tra cui H. F. C. Pardo, T. Mancini & J. Olmo, “*Machine Learning the Carbon Footprint of Bitcoin Mining*” (2022), ResearchGate.

<sup>17</sup> I termini si riferiscono all'impatto netto di un'attività sulle emissioni di gas serra, in particolare di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>). Carbon neutral implica emissioni pari a zero (bilancio netto nullo), carbon negative implica che le emissioni rimosse superano quelle prodotte (bilancio netto negativo).

<sup>18</sup> Osservazione confermata dal paper scientifico di E. Di Febo, A. Ortolano, M. Foglia, M. Leone & E. Angelini, “*From Bitcoin to carbon allowances: An asymmetric extreme risk spillover*” (2021), Consensus.

<sup>19</sup> Come osservato dal paper scientifico di A. Lamba, “*Are carbon offsets the key to green cryptocurrencies?*” (2022), Consensus.

La regolamentazione del mining in Russia mostra invece un approccio diverso, cercando di legalizzare e strutturare il settore piuttosto che limitarlo. Tuttavia, resta il rischio che il mining russo contribuisca a una maggiore intensità di carbonio, data la predominanza di fonti fossili nel mix energetico locale. Inoltre, vi sono studi che suggeriscono strategie innovative per il mining sostenibile, attraverso l'adozione di mix energetici più verdi e il trasferimento di attività verso giurisdizioni con fonti energetiche rinnovabili.

**Bitcoin inquina? Bitcoin consuma?** Prima di affrontare le ultime analisi di dati forniti dal dipartimento dell'Università di Cambridge, il CCAF (*Cambridge Centre for Alternative Finance*), si rende necessario approfondire una tematica molto importante spesso tralasciata: l'uomo è molto efficiente e profittevole nella produzione di energia ma molto poco nell'immagazzinamento e nel trasporto. Si pensi che buona parte della corrente elettrica distribuita si disperde a causa dell'effetto *joule*<sup>20</sup>. Per mitigare questo effetto nelle lunghe distanze, si tende ad installare dei tensionatori lungo il tragitto per aumentare la tensione dei cavi in modo da far disperdere meno calore e trasportare più corrente e installando cavi di maggiore efficienza, di conseguenza rendendo costoso e poco profittevole il trasporto. Per cercare di ridurre al midollo questo problema, ecco che aziende di mining di Bitcoin si inseriscono nelle zone in cui c'è eccesso di offerta di energia. Nel 2022, su *Nature*<sup>21</sup>, una cooperazione di *mining pool* pubblica un'analisi contenente numerosi dati sufficienti per stimare con esattezza la geolocalizzazione dei miner nel mondo. Costruendo una mappa geografica della distribuzione di oltre 6000 miner (Figura.1), la cooperazione ha notato che la rete è estremamente distribuita, rendendo stimabile un calcolo della percentuale di energia che ogni miner consuma.

---

<sup>20</sup> È un fenomeno fisico per il quale l'energia elettrica si trasforma in calore quando la corrente elettrica attraversa un conduttore con una resistenza elettrica.

<sup>21</sup> Confermata anche dal paper scientifico di W. Sun, H. Jin, F. Jin, L. Kong, Y. Peng & Z. Dai, "*Spatial analysis of global Bitcoin mining*" (2022), scientific reports (Nature).



Comparando questa mappa con quella delle centrali di produzione di energia elettrica, sia a combustibili fossili sia con fonti rinnovabili e nucleare (Figura.2), si nota come il mining di Bitcoin è presente maggiormente laddove si produce energia con fonti rinnovabili o nucleare, salvo alcuni casi di utilizzo di energia derivante da fonti a combustibili fossili.



Figura.1 – Presenza globale di attività di mining di Bitcoin (n = 6062). Mappa creata da Geoda e pubblicata su Nature.

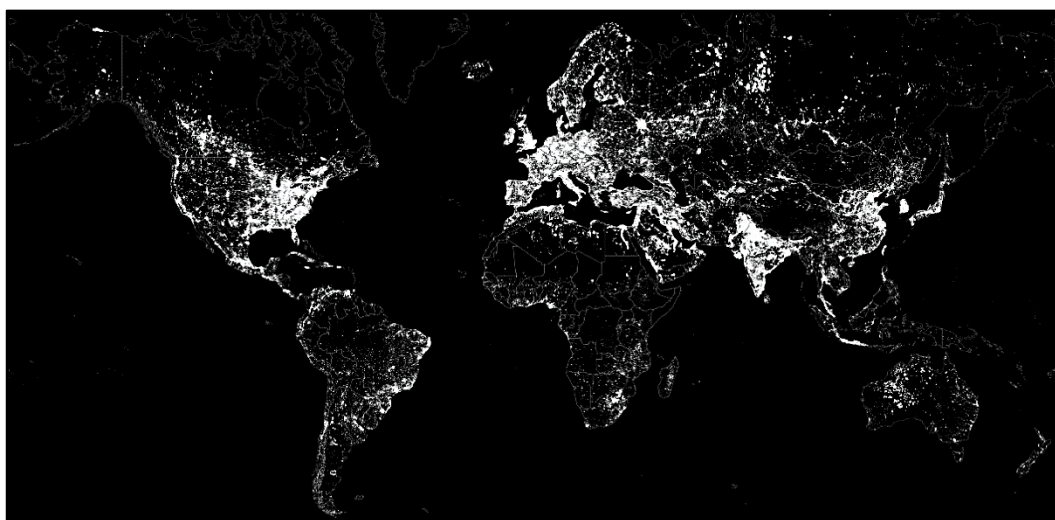


Figura.2 – Distribuzione centrali di produzione di energia elettrica con fonti fossili, rinnovabili e nucleare. Mappa fornita da gocompare.com con dati IEA.



Il CBECI<sup>22</sup> mostra come il consumo energetico di Bitcoin rappresenta una piccola frazione del consumo energetico globale. Gran parte dell'energia utilizzata per il mining proviene da fonti rinnovabili<sup>23</sup>, riducendo così l'impatto ambientale complessivo (come conferma anche lo studio precedentemente citato di Nature).

Il dipartimento fornisce numerosi dati a riguardo di cui si analizzano alcuni esempi:

- La domanda di potenza del network di Bitcoin è pari a 19,64 GW, mentre il consumo annualizzato è pari a 172,12 TWh. La diretta correlazione tra i due dati implica che più efficienti diventano i dispositivi, minore è la potenza richiesta per sostenere lo stesso livello di attività. Invece, l'efficienza hardware è di 22,38 J/TH, contribuendo a determinare la domanda energetica complessiva. Un miglioramento dell'efficienza ridurrebbe il consumo totale della rete. Si pensi che nel 2017 l'efficienza media era di circa 100 J/TH, un netto miglioramento negli ultimi anni.
- Per un confronto, si tenga presente che la produzione mondiale di elettricità è pari a 29.031 TWh con un consumo di 25.530 TWh e quindi uno spreco di 3.501 TWh, ossia il 12%, capace di soddisfare per un anno i consumi di Francia e Germania messi insieme, oppure circa un miliardo di abitazioni europee per un anno. Il mining di Bitcoin consuma lo 0,67% del totale annuale. La produzione mondiale di energia è pari a 175.892 TWh con un consumo di 169.624 TWh, quindi uno spreco di 6268 TWh, ovvero il 3,56%.

---

<sup>22</sup> Il CBECI (*Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index*) è uno strumento sviluppato dal "Cambridge Digital Assets Programme" (CDAP) al dipartimento "Cambridge Centre for Alternative Finance" (CCAF) presso la "Judge Business School" dell'Università di Cambridge. Esso fornisce stime in tempo reale del consumo energetico della rete Bitcoin, offrendo una valutazione sia giornaliera che annualizzata dell'elettricità utilizzata per il mining. Il dipartimento raccoglie dati attraverso un modello che considera l'efficienza dell'hardware di mining, la distribuzione geografica dei miner e i costi dell'elettricità, informazioni integrate con dati pubblici e *partnership* con mining pool per garantire accuratezza. L'obiettivo è fornire una comprensione chiara dell'impatto energetico del Bitcoin, facilitando confronti con altri settori e promuovendo discussioni informate sulle implicazioni ambientali dei cryptoasset, fornendo dati comprovati. Il sito ed i dati discussi sono disponibili a: <https://ccaf.io/>. Dati aggiornati al 01/03/2025.

<sup>23</sup> I dati commentati sono confermati dal paper scientifico di J. Sedlmeir, H. U. Buhl, G. Fridgen & R. Keller, "The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth" (2020), ResearchGate.

Questo spreco di risorse è equivalente al consumo annuo degli Stati Uniti, 2 volte il fabbisogno energetico dell'UE, l'intera Asia (Cina esclusa) e capace di soddisfare il consumo elettrico dell'Africa per 9 anni. Bitcoin utilizza lo 0,26% del totale annuo (si veda Figura.3).

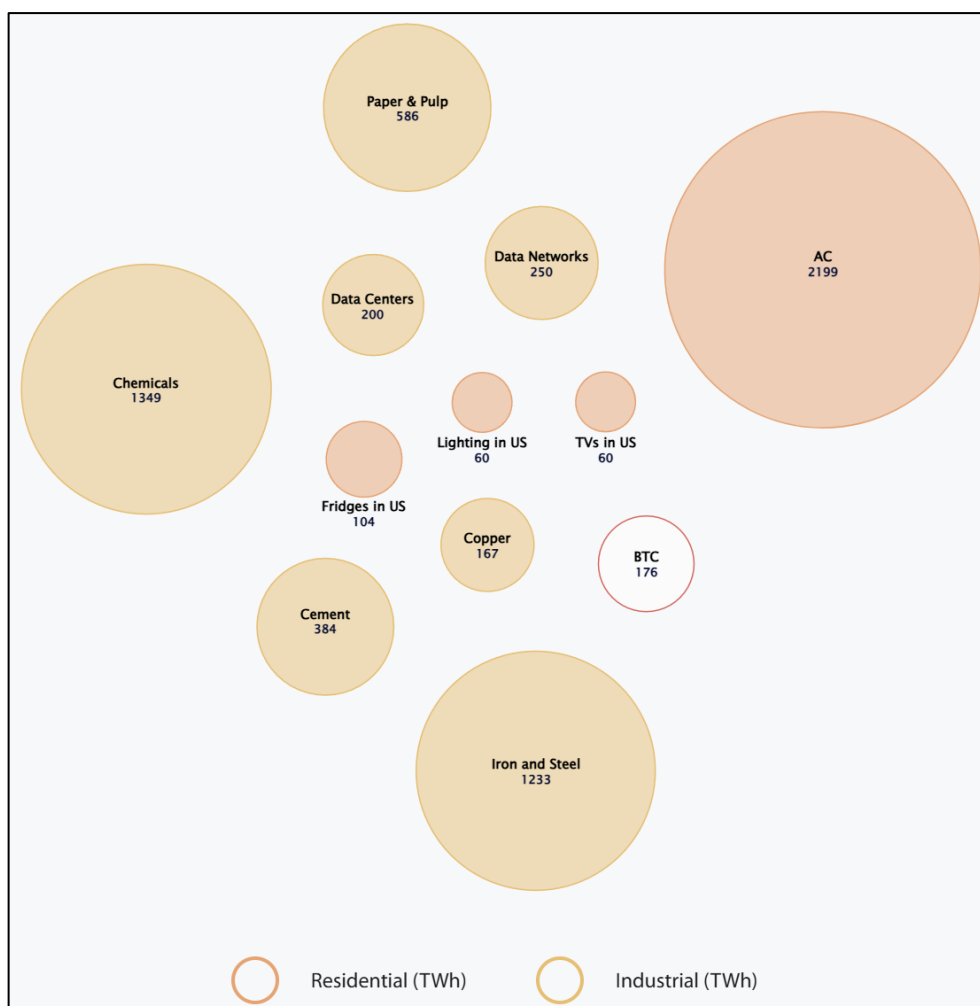


Figura.3 – Utilizzo di energia del mining di Bitcoin in proporzione ad altri usi divisi tra industriali e residenziali. Tipo di dati quantitativi e non qualitativi. Grafico fornito dal CBECI. “AC” sta per “Air Conditioning”.

- La perdita di elettricità americana dovuta al trasporto e alla distribuzione è pari a 206 TWh capaci di alimentare l'intero network Bitcoin 1,2 volte. Il potenziale recupero del *gas flaring*<sup>24</sup> globale, pari a 688 TWh, potrebbe alimentare 4 volte l'intero ecosistema Bitcoin.

<sup>24</sup> Il gas flaring consiste nella combustione controllata del gas naturale associato (dalle 8 alle 25 volte più clima alterante della CO<sub>2</sub>), un sottoprodotto delle operazioni di estrazione petrolifere.

- La Cina ha ridotto la produzione di energia da fonti rinnovabili di 105 TWh, grandezza equipollente al 60% del network Bitcoin. Inoltre, la Cina consuma come il 4.540,81% di Bitcoin, gli USA come il 2.314,88%.
- Le emissioni di GHG<sup>25</sup> del mining di Bitcoin, se i miner si affidassero a diverse fonti di energia, si stimano essere di 94,85 MtCO<sub>2</sub>e, ossia lo 0,21% delle emissioni mondiali in un anno<sup>26</sup> (45.577,978 MtCO<sub>2</sub>e); se si affidassero solo all'idroelettrico le emissioni crollerebbero a 3,93 MtCO<sub>2</sub>e, ossia lo 0,009% delle emissioni mondiali annuali. Se invece si usasse solo energia proveniente dal carbonio, le emissioni di GHG arriverebbero a 187,38 MtCO<sub>2</sub>e, ossia lo 0,41% delle emissioni mondiali annue (si veda Figura.4).

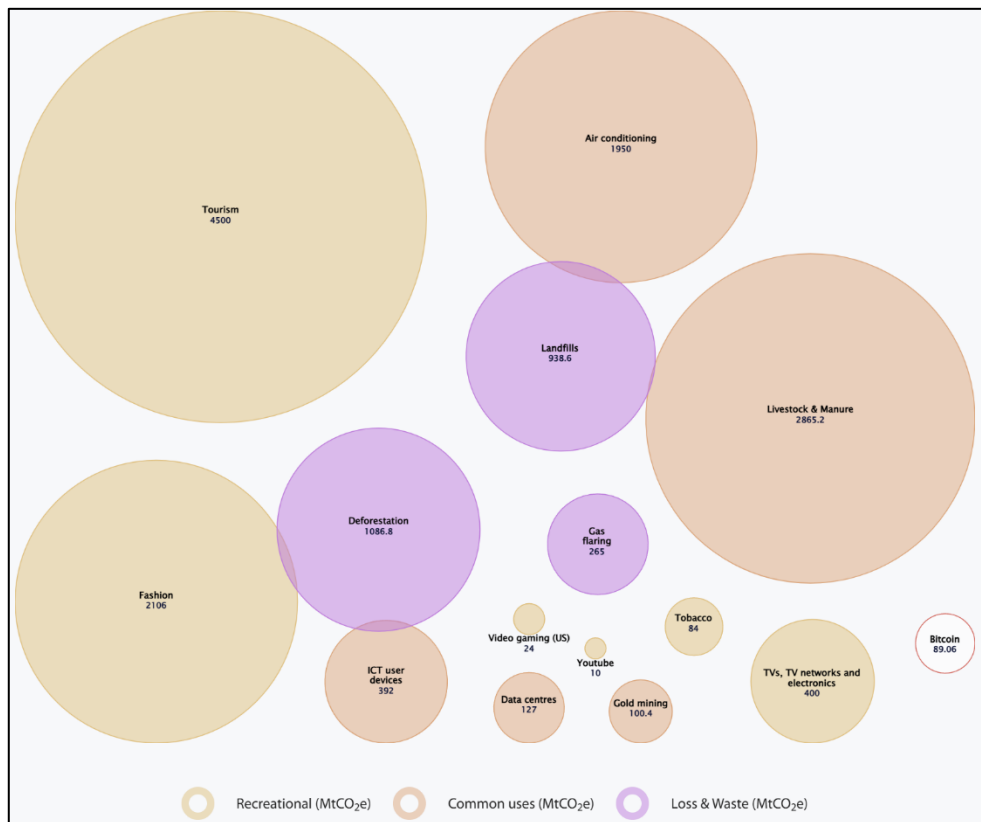


Figura.4 – Emissioni di GHG del mining di Bitcoin in confronto a consumi di tipo ricreativo, industriale o attività di uso comune. Tipo di dati quantitativi e non qualitativi. Grafico fornito dal CBECI.

<sup>25</sup> *Greenhouse Gases* (GHG o gas a effetto serra), includono anidride carbonica, metano, ossido di azoto e gas fluorurati. Questi gas intrappolano il calore nell'atmosfera, contribuendo al riscaldamento globale e ai cambiamenti climatici.

<sup>26</sup> Dato del 2024 fornito da "Our World in Data": <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>.

Uno studio del MIT<sup>27</sup> di giugno 2023 ha rilevato che almeno il 38% dell'attività globale di mining si è trasferita negli Stati Uniti e in Canada entro la fine del 2022 (anche a seguito del “*mining ban*” cinese), con emissioni di carbonio stimate in 7,2 MtCO<sub>2</sub>e all'anno per 13 miner quotati pubblicamente negli Stati Uniti (ossia lo 0,055% delle emissioni mondiali, dato IEA). Secondo un'analisi di “*Batcoinz*” di giugno 2023, l'energia idroelettrica rappresenta circa il 23% dell'energia totale utilizzata nel mining di Bitcoin, rendendola la principale fonte energetica. L'energia eolica costituisce quasi il 14%, mentre il carbone e il gas naturale rappresentano rispettivamente il 22,92% e il 21,14%. Questi dati suggeriscono che una parte significativa del mining di Bitcoin utilizza fonti rinnovabili, ma esiste ancora una dipendenza non trascurabile dai combustibili fossili. In risposta, secondo il “*Bitcoin Mining Council*” (BMC), nel 2021 l'energia proveniente da fonti rinnovabili rappresentava solo il 36,8%, mentre oggi si è raggiunto un mix sostenibile superiore al 60% in alcuni periodi. Inoltre, il BMC ha affermato che l'intensità delle emissioni della rete Bitcoin (che misura la quantità di emissioni di carbonio rilasciate per unità di energia utilizzata) è diminuita del 50% negli ultimi quattro anni. Questo miglioramento è attribuito all'aumento dell'uso di energie rinnovabili e all'efficienza energetica dell'hardware utilizzato.

Tabella.1 – Efficienza del mining. Rielaborazione interna (dati CBECI).

Anno	Efficienza hardware (J/TH)	Consumo energetico totale (TWh)	Fonti rinnovabili
2010	500	1	5%
2025	22,38	172,12	60%

Batcoinz ha sviluppato un modello per calcolare in modo accurato e dinamico le emissioni della rete Bitcoin, tenendo conto dell'efficienza degli ASIC utilizzati nel mining e delle diverse fonti energetiche impiegate<sup>28</sup>.

<sup>27</sup> C. Stoll, L. Klaaben, U. Gellersdorfer & A. Neumuller, “*Climate Impacts of Bitcoin Mining in the U.S.*” (2023), CEEPR (MIT – Centre for Energy and Environmental Policy Research).

<sup>28</sup> Per un approfondimento si consultino: <https://batcoinz.com/accurately-dynamically-calculating-bitcoin-network-emissions/> e <https://batcoinz.com/bitcoin-by-energy-source/>.

L'analisi suggerisce che le stime precedenti potrebbero aver sovrastimato le emissioni effettive della rete Bitcoin, evidenziando la necessità di metodologie più precise per valutare l'impatto ambientale. Altri studi<sup>29</sup> suggeriscono che Bitcoin possa essere utilizzato per bilanciare la domanda e l'offerta di energia nelle reti elettriche, contribuendo a un futuro più sostenibile. Articoli su Forbes mostrano come il mining di Bitcoin, entro il 2026, sarà in grado di mitigare più emissioni terze (generate da industrie) rispetto a quelle che produce, divenendo così un'industria sempre più carbon negative. Attualmente il 20% dell'industria di mining di Bitcoin è carbon negative. Inoltre, per un confronto, si pensi che Bitcoin consuma il 35% in meno rispetto alle banche tradizionali.

**Bitcoin, un bene sociale.** Oltre ai benefici ambientali potenziali, Bitcoin ha significativi impatti sociali. Infatti, la sua natura distribuita offre un accesso finanziario a individui in regioni con infrastrutture bancarie limitate, migliorando l'inclusione finanziaria. Uno studio del “*Project Syndicate*” evidenzia come Bitcoin possa offrire a milioni di persone *unbanked*<sup>30</sup> la possibilità di partecipare all'economia globale, riducendo la povertà e favorendo lo sviluppo economico. Altri studi mostrano che l'inclusione di Bitcoin in portafogli diversificati può migliorare il rapporto rischio-rendimento e, in alcuni casi, ridurre le emissioni aggregate, dimostrando un potenziale beneficio economico che alcuni considerano bilanciare il suo piccolo impatto ambientale.

---

<sup>29</sup> In accordo con il paper scientifico di H. P. Winotoatmojo, S. Y. Lazuardy, F. Arland & A. A. Setyawan, “*Environmental Impact of Cryptocurrency Mining: Sustainability Challenges and Solution*” (2024), ResearchGate.

<sup>30</sup> Il dato fornito da World Bank di aprile 2024 evidenzia come ci siano 1,4 miliardi di persone che non hanno un conto bancario o accesso a qualsiasi tipo di servizio finanziario. Bitcoin risolve questo problema, come testimoniano i casi studio di Kenya e Congo.

## 1.2 Energia nucleare

---

L'energia nucleare è una componente critica per raggiungere gli obiettivi di riduzione delle emissioni di gas serra e sostenere le strategie globali per la sostenibilità energetica, offrendo una fonte stabile, sostenibile, efficiente, sicura e resiliente con un impatto di GHG pressoché nullo. Il nucleare è fondamentale per iniziare e raggiungere il processo di decarbonizzazione, ormai diventato indispensabile. L'energia nucleare è sostanziale da inserire nel mix energetico di uno Stato, in particolare in Paesi con elevate esigenze energetiche e infrastrutture consolidate in combustibili fossili, al fine di abbassare le emissioni di gas clima alteranti e produrre energia e corrente elettrica pulita e a basso costo.

**Nuove tecnologie avanzate.** È noto che vi sono quattro generazioni di centrali nucleari: la prima generazione (anni '50-'60) riguardava reattori sperimentali e prototipi, la seconda generazione (anni '60-'90) concerneva reattori ad acqua pressurizzata (PWR) e ad acqua bollente (BWR), ampiamente adottati per la produzione commerciale e tuttora in uso in alcuni Paesi, la terza e quarta generazione sono attualmente le più diffuse, precisamente la terza generazione ha introdotto negli anni 2000 nuove misure di sicurezza, portando alla nascita di nuovi reattori più efficienti e centrali più affidabili, la quarta generazione, invece, riguarda tecnologie progettate per essere sicure, sostenibili ed economiche, con particolare attenzione alla riduzione dei rifiuti radioattivi e all'efficienza del combustibile. Tra le nuove tecnologie<sup>31</sup> di quarta generazione troviamo gli SMR (*Small Modular Reactors*) che rappresentano una delle innovazioni più promettenti nel panorama delle tecnologie nucleari avanzate. Questi reattori sono progettati per essere maggiormente sicuri ed economicamente più competitivi rispetto ai reattori tradizionali di grandi dimensioni. Gli SMR nascono con l'obiettivo di migliorare l'efficienza energetica, la sostenibilità ambientale e ridurre i rischi associati alla produzione nucleare.

---

<sup>31</sup> In linea con quanto osservato dal paper scientifico di L. Zhan, Y. Bo, T. Lin & A. Fan, "Development and outlook of advanced nuclear energy technology" (2021), Consensus.

Essi hanno capacità variabili tra 10 MW e 300 MW, significativamente inferiori ai reattori tradizionali che superano spesso 1.000 MW, ma la loro modularità consente di produrre le componenti necessarie in fabbrica, abbattendo così i costi e i tempi di realizzo. Molti SMR utilizzano sistemi di raffreddamento passivo, che non richiedono energia elettrica esterna per prevenire il surriscaldamento. Questo tipo di reattori modulari sono ideali per alimentare reti elettriche isolate, impianti industriali e aree remote dove grandi reattori non sarebbero economicamente sostenibili. Possono essere utilizzati anche per la produzione di idrogeno verde e per la desalinizzazione dell'acqua, come nei progetti di *High-Temperature Gas Reactors* (HTGR). I reattori di nuova generazione sono progettati per massimizzare l'efficienza del combustibile nucleare, riducendo così la quantità di scorie radioattive prodotte. Alcuni SMR possono anche riutilizzare combustibile esausto di reattori convenzionali, contribuendo alla gestione dei rifiuti nucleari. Oltre agli SMR, altre tecnologie di quarta generazione includono gli HTGR, ossia reattori che utilizzano gas inerti, come l'elio, come refrigerante. Essi operano a temperature superiori rispetto ai reattori tradizionali (fino a 1.000°C), migliorando l'efficienza termodinamica e rendendoli ideali per applicazioni industriali ad alta intensità energetica, come la produzione di idrogeno. Inoltre, vi sono reattori veloci raffreddati al sodio (SFR - *Sodium-Cooled Fast Reactors*) che utilizzano sodio liquido come refrigerante, con ottime proprietà di conduzione termica e che permettono di operare a pressioni più basse rispetto ai PWR. Poi vi sono reattori veloci raffreddati al piombo (LFR - *Lead-Cooled Fast Reactors*) che utilizzano piombo liquido o una miscela piombo-bismuto come refrigerante, garantendo un'eccellente capacità di raffreddamento anche senza circolazione forzata. Questo riduce il rischio di reazioni chimiche pericolose e supporta l'utilizzo di combustibili avanzati, come il torio. Secondo l'“*International Atomic Energy Agency*” (IAEA), gli SMR potrebbero ridurre i costi di costruzione fino al 30% rispetto ai reattori tradizionali, grazie alla modularità e alla produzione in serie. Gli HTGR possono raggiungere un'efficienza termica fino al 50%, contro il 33% dei PWR di seconda generazione. Studi condotti dal “*World Nuclear Association*” stimano che i reattori veloci potrebbero ridurre la quantità di rifiuti radioattivi a lunga vita fino al 90%, trasformando l'energia nucleare in una soluzione più sostenibile e sicura.

A questo punto è doverosa una breve digressione su un'altra nuova tecnologia avanzata riguardante il nucleare ma non ancora in commercio: i reattori a fusione nucleare. Il processo di fusione nucleare coinvolge il nucleo degli atomi, come la fissione, ma ne differisce per il funzionamento. Mentre la fissione avviene dallo scontro di nuclei atomici che si dividono creando energia e scontrandosi in un processo a catena con altri nuclei, la fusione nucleare consiste nell'unione di questi nuclei che libera una quantità di energia maggiore rispetto alla fissione. Tuttavia, la fusione richiede condizioni estreme per essere innescata e mantenuta, rendendola ancora oggi tecnologicamente molto complessa da sfruttare su scala commerciale. Sul piano ambientale, la fusione presenta vantaggi notevoli: non produce gas serra né scorie radioattive a lunga vita, e il combustibile principale, come il deuterio, è abbondante e disponibile in natura. La fissione, pur essendo costosa in termini di costruzione e gestione delle centrali, è una tecnologia matura con costi relativamente prevedibili. La fusione, invece, richiede investimenti straordinari nella ricerca e nello sviluppo di infrastrutture, con prospettive di ritorno economico ancora lontane. Questi campi di ricerca sono analizzati da progetti internazionali come l'ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). Tuttavia, se la fusione dovesse diventare una realtà commerciale, potrebbe rivoluzionare il settore energetico con un'energia pressoché inesauribile e a basso impatto ambientale.

**Scorie.** La gestione delle scorie radioattive<sup>32</sup>, più precisamente combustibile esausto, derivanti dalla fissione nucleare nelle centrali nucleari dedite alla produzione di energia e corrente elettrica, è un processo complesso e rigoroso, finalizzato a garantire la sicurezza umana e la protezione ambientale. Questo processo si articola in diverse fasi, ciascuna con specifiche metodologie e protocolli. I rifiuti radioattivi sono classificati principalmente in tre categorie, in base al livello di radioattività e al tempo di decadimento dei radionuclidi: rifiuti a bassa attività (LLW - *Low Level Waste*), a media attività (ILW - *Intermediate Level Waste*) e rifiuti ad alta attività (HLW - *High Level Waste*).

---

<sup>32</sup> In argomento è stata consultata il paper scientifico di M. Abedin, Md. W. Rahman & Md. S. Chowdhury, “*Efficiency analysis of nuclear power plants: A comprehensive review*” (2023), Consensus.



I livelli contengono diverse concentrazioni di isotopi radioattivi con tempi di dimezzamento differenti; a seconda del livello si richiedono misure di isolamento per periodi di tempo brevi e medio-lunghi. Vi sono diverse fasi della gestione e classificazione dei rifiuti radioattivi, tra cui la loro caratterizzazione, utile al fine di stabilire le modalità di trattamento e smaltimento appropriate. Inoltre, vi è il trattamento dei rifiuti per ridurre il volume e modificarne le caratteristiche con lo scopo di facilitare le fasi successive. A questo punto, i rifiuti trattati vengono immobilizzati e sigillati in contenitori idonei, resistenti alla corrosione e alle sollecitazioni meccaniche; quindi, conservati in strutture appositamente progettate per garantire l'isolamento dalla biosfera. Lo stoccaggio temporaneo consente il decadimento dei radionuclidi a vita breve e offre flessibilità nella gestione operativa. Per i rifiuti a bassa e media attività lo smaltimento avviene generalmente in depositi superficiali o a bassa profondità. Per i rifiuti ad alta attività è previsto lo smaltimento in depositi geologici profondi, situati a centinaia di metri sotto la superficie terrestre, in formazioni geologiche stabili che garantiscano l'isolamento per migliaia di anni<sup>33</sup>. Inoltre, vi è la possibilità del riprocessamento del combustibile esausto per recuperare materiale fissile<sup>34</sup>. La gestione dei rifiuti radioattivi è regolamentata da normative nazionali e internazionali che stabiliscono criteri rigorosi per ogni fase del processo, assicurando la protezione della salute pubblica e dell'ambiente. Anche se i reattori nucleari non producono emissioni dirette di CO<sub>2</sub>, l'intero ciclo di vita (dalla produzione del combustibile nucleare alla costruzione e smantellamento dei reattori) ha comunque un'impronta ecologica. Gli SMR offrono un'opportunità unica per i Paesi in via di sviluppo, garantendo accesso all'energia in aree remote e promuovendo lo sviluppo economico senza aumentare le emissioni di gas serra.

---

<sup>33</sup> La Finlandia è all'avanguardia con il progetto “*Onkalo*”, un deposito geologico profondo progettato per contenere in modo sicuro le scorie per migliaia di anni.

<sup>34</sup> Questo processo, complesso e costoso, viene attuato per cercare di riciclare il maggior quantitativo possibile di combustibile, processo che ad oggi viene adottato in alcune centrali nucleari francesi.

Si suggerisce che, per raggiungere una vera decarbonizzazione<sup>35</sup>, il nucleare debba essere combinato con tecnologie di cattura e stoccaggio della CO<sub>2</sub>, oltre a sistemi di accumulo di energia, per mitigare le fluttuazioni di produzione delle rinnovabili. Diversi studi propongono l'utilizzo di energia nucleare per alimentare direttamente tecnologie per la cattura della CO<sub>2</sub> atmosferica, contribuendo ulteriormente alla riduzione delle emissioni globali. Le implicazioni politiche ed economiche delle tecnologie nucleari sono strettamente collegate agli impegni internazionali, come l'Accordo di Parigi e il Green Deal europeo, che mirano alla neutralità climatica entro la metà del secolo. Con la ratifica dell'Accordo, gli obiettivi del Green Deal europeo e la tassonomia verde, il nucleare è stato proposto come una delle alternative chiave per ridurre le emissioni e raggiungere gli obiettivi di neutralità climatica. Tuttavia, persistono preoccupazioni legate alla gestione dei rifiuti radioattivi e alla sicurezza, ma i recenti progressi tecnologici, come i reattori a fusione, gli SMR e gli HTGR, promettono soluzioni più sicure e sostenibili. Questa decisione ha suscitato dibattiti tra gli Stati membri, con Paesi come Francia e Finlandia che sostengono il nucleare come indispensabile per raggiungere gli obiettivi climatici, mentre altri, come la Germania, mantengono una posizione più cauta a causa delle preoccupazioni legate alla sicurezza e alla gestione delle scorie.

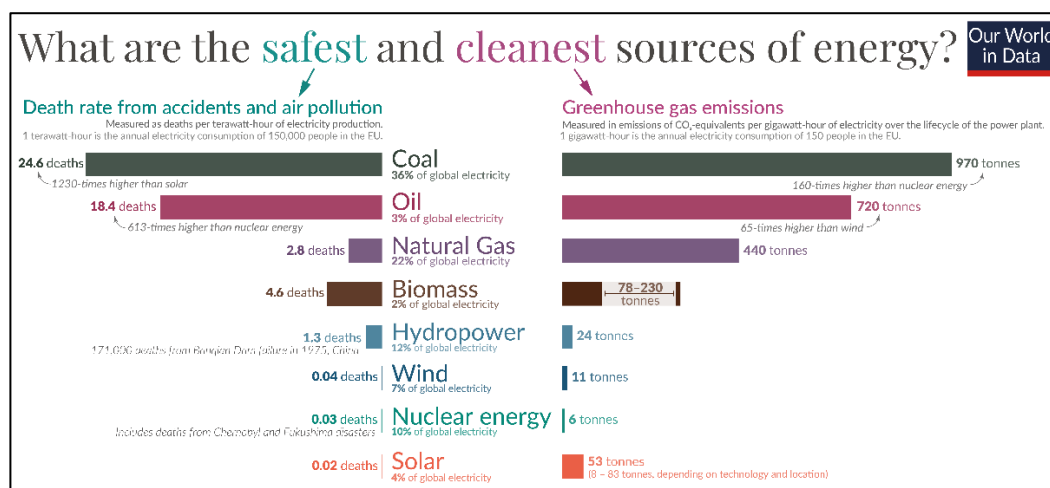


Figura.5 – Grafico di “Our World in Data”. Confronto tra fonti di produzione di energia rispetto a sicurezza ed emissioni di gas inquinanti.

<sup>35</sup> In accordo con i paper scientifici di V. Pershukov, V. Artisyuk & Kashirsky, “*Paving the Way to Green Status for Nuclear Power*” (2022), Consensus; J. M. Pearce, “*Limitations of Nuclear Power as a Sustainable Energy Source*” (2012), Consensus; J. A. M. Porto, L. de J. Alves, F. C. Nunes & E. Gross, “*Nuclear energy and its role in decarbonization: Scenarios and perspectives*” (2024), ResearchGate.

Inoltre, si propone l'analisi grafica (Figura.5, pagina precedente) delle fonti energetiche più sicure (in termini di tasso di mortalità) e più pulite (in termini di emissioni GHG). Si può osservare che:

- carbone e petrolio sono le fonti energetiche più letali e inquinanti;
- il nucleare offre una combinazione eccezionale di bassa mortalità e basse emissioni;
- le rinnovabili (eolico, solare e idroelettrico) rappresentano alternative valide ma con limiti legati all'intermittenza.

La gestione delle scorie nucleari richiede soluzioni tecniche e sociali per garantire l'isolamento sicuro dei materiali radioattivi, riducendo i rischi per l'uomo e l'ambiente. La ricerca si concentra su tecnologie avanzate come la trasmutazione nucleare, mentre trasparenza e partecipazione pubblica sono cruciali per il successo delle strategie di localizzazione dei depositi e stoccaggio delle scorie.

**Regolamentazioni.** La regolamentazione del settore nucleare è fondamentale per garantire sicurezza, protezione ambientale e salute pubblica. Questo complesso quadro normativo si sviluppa su tre livelli principali: internazionale, europeo e nazionale. A livello globale, l'IAEA stabilisce *standard* e linee guida per l'uso sicuro e pacifico dell'energia nucleare. La “Convenzione sulla Sicurezza Nucleare”, adottata nel 1994, è uno strumento chiave che impegna gli Stati aderenti a mantenere elevati livelli di sicurezza negli impianti nucleari. Tutti i paesi dell'Unione Europea, Italia inclusa, sono parte di questa convenzione. L'UE, attraverso la “Comunità Europea dell'Energia Atomica” (Euratom), ha sviluppato una serie di direttive per armonizzare la regolamentazione nucleare tra gli Stati membri. L'Euratom stabilisce un quadro comunitario per la sicurezza nucleare degli impianti nucleari, imponendo agli Stati membri l'obbligo di istituire e mantenere un quadro nazionale per la sicurezza nucleare. Inoltre, istituisce uno strumento europeo per la cooperazione internazionale in materia di sicurezza nucleare, volto a integrare lo strumento di vicinato, cooperazione allo sviluppo e cooperazione internazionale.

**Nucleare in Italia.** In Italia, la regolamentazione del settore nucleare è disciplinata da una serie di leggi e decreti che recepiscono le direttive europee e attuano le convenzioni internazionali. L'“Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione” (ISIN) è l'autorità competente responsabile della regolamentazione, del controllo e della vigilanza in materia di sicurezza nucleare e radioprotezione. L'ISIN ha recentemente pubblicato una guida tecnica che definisce i criteri di sicurezza nucleare e radioprotezione per la gestione dei rifiuti radioattivi, basandosi sugli standard internazionali più aggiornati. È importante notare che, a seguito dei referendum del 1987 e del 2011, l'Italia ha cessato la produzione di energia nucleare, che nel Paese è stata attiva dal 1963 al 1987. Tuttavia, il governo italiano sta attualmente valutando la possibilità di reintrodurre l'energia nucleare nel mix energetico nazionale, con particolare interesse per i reattori di terza e quarta generazione, grazie anche al supporto della *start-up* italiana “*Newcleo*”. Inoltre, è prevista la creazione di una nuova società, con la partecipazione di Enel, Ansaldo Nucleare e Leonardo, dedicata alla ricerca e allo sviluppo di queste tecnologie. Dal 1952, è presente un ente pubblico di ricerca finalizzato alla promozione, ricerca e sviluppo di tecnologie avanzate e sostenibili, l'ENEA (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile). Esso è parte attiva di reti internazionali come l'IAEA per il nucleare e l'ITER per la fusione nucleare. L'ente è anche presente in programmi UE come “*Horizon Europe e Life*” per l'innovazione tecnologica e la sostenibilità. L'ENEA rappresenta un pilastro fondamentale per l'attuazione delle politiche italiane di transizione ecologica, indipendenza energetica e riduzione delle emissioni di gas serra. Fornisce studi, supporto e innovazioni tecnologiche per promuovere un modello energetico più pulito, efficiente e sostenibile. Altresì, la “Piattaforma Nazionale per un Nucleare Sostenibile” ha evidenziato il ruolo strategico delle centrali nucleari nel mix energetico in Italia per la decarbonizzazione del Paese.

**Economia nucleare.** L'energia nucleare è caratterizzata da un *capacity factor*<sup>36</sup> anche di oltre il 90%, rendendola molto più efficiente rispetto alle fonti rinnovabili come il solare e l'eolico, che dipendono dalle condizioni atmosferiche.

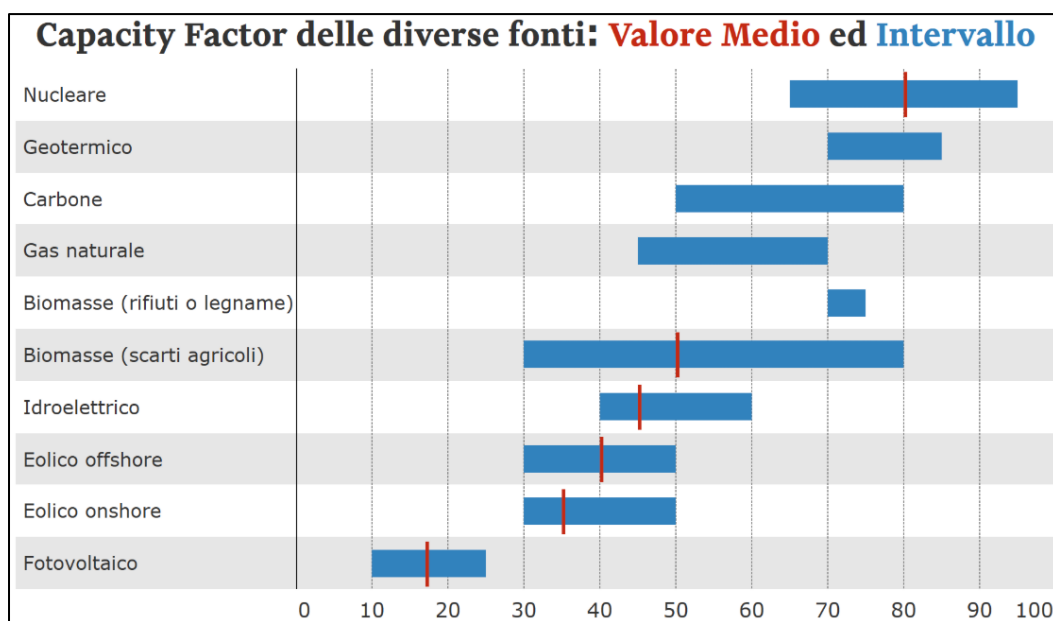


Figura.6 – Grafico a cura di “Nucleare e Ragione”. Elaborazione con dati di IEA, IRENA, Bolsona et al. & PRIS.

Questo rende il nucleare particolarmente utile come fonte di energia di base, complementare alle rinnovabili<sup>37</sup>. Sebbene i costi iniziali di costruzione e gestione degli impianti nucleari siano elevati, inclusi quelli legati alla gestione delle scorie e al *decommissioning*<sup>38</sup>, il costo di produzione per kWh diventa competitivo nel lungo periodo, grazie alla lunga durata operativa degli impianti, che può superare i 60 anni. Dal punto di vista economico, il nucleare rappresenta un'opportunità per creare un sistema energetico competitivo e a lungo termine.

<sup>36</sup> Il capacity factor di una centrale nucleare indica la percentuale di tempo in cui l'impianto opera alla sua piena capacità durante un anno in rapporto alla sua capacità massima teorica. Per il nucleare, questo valore è tipicamente superiore al 90%, molto più alto rispetto alle energie rinnovabili intermittenti come solare ed eolico, il quale oscilla tra il 10% e il 50%, mentre l'idroelettrico può arrivare al massimo al 60%.

<sup>37</sup> In linea con quanto osservato nel paper scientifico di M. Terasenko, K. Kozak & L. Omeiza, “Energy efficiency and environmental friendliness of nuclear power plants and wind power plants” (2023), Consensus.

<sup>38</sup> Con “smantellamento degli impianti nucleari” (o decommissioning) si identificano tutte le azioni da intraprendere nei tempi successivi alla cessazione del servizio delle centrali nucleari. In genere lo scopo è quello di giungere alla completa demolizione di un impianto con la rimozione di ogni vincolo dovuto alla presenza di materiali radioattivi ed alla restituzione del sito per altri usi.

I costi iniziali di costruzione e sviluppo delle infrastrutture nucleari sono elevati, ma i reattori, una volta operativi, garantiscono costi di generazione stabili e prevedibili per decenni e bassi prezzi<sup>39</sup>. La distinzione tra costi e prezzi dell'energia è cruciale per comprendere le dinamiche economiche e sociali legate alla produzione e al consumo di energia elettrica:

- i costi dell'energia si riferiscono a tutte le spese sostenute dagli imprenditori o dai produttori per generare e distribuire energia e includono: costi di capitale (infrastrutture), costi operativi (manutenzione impianti), costi di approvvigionamento energetico, costi ambientali, costi di innovazione e di sviluppo. I produttori tendono a ottimizzare questi costi per aumentare la redditività e mantenere competitiva l'offerta sul mercato energetico, massimizzando i profitti;
- i prezzi sono quelli pagati dai consumatori finali e includono una serie di elementi aggiuntivi rispetto ai costi di produzione: costi di trasmissione e distribuzione, tasse e accise, costi di mercato e margini di profitto delle *utility*, ossia quel rincaro che spesso le aziende energetiche aggiungono per coprire costi amministrativi e garantire profitti.

Queste considerazioni servono a sottolineare come non necessariamente i costi e i prezzi delle varie fonti di energia sono equivalenti o quanto meno confrontabili. Ad esempio, la Germania, con il 26% di energia prodotta con rinnovabili, ha investito massicciamente nella transazione energetica (*Energiwende*) con un'espansione delle fonti rinnovabili e la successiva chiusura di numerose centrali nucleari. Tuttavia, l'intermittenza delle rinnovabili richiede infrastrutture di supporto, aumentandone i costi, e gli incentivi governativi hanno comportato sussidi elevati finanziati attraverso oneri aggiuntivi sulle bollette energetiche. Infatti, i fruitori tedeschi pagano alcuni dei prezzi più alti in Europa per l'energia elettrica. Altro esempio dell'utilizzo di rinnovabili che non indicano necessariamente prezzi minori, è la Danimarca, con il 48% di energia ricavata da fonti rinnovabili.

---

<sup>39</sup> Come osservato da J.-M. Burniaux, J. Chateau, R. Dellink & R. A. Duval, “*The Economics of Climate Change Mitigation: How to Build the Necessary Global Action in a Cost-Effective Manner*” (2009), ResearchGate (OECD – Organization for Economic Co-operation and Development).

I consumatori danesi sono costretti a pagare anch'essi i prezzi più elevati d'Europa, aggravati da costi operativi ingenti e alte tasse e accise, dovute anche all'*export*. Mentre la Francia, dove il 74% dell'energia è prodotta da centrali nucleari, ha storicamente mantenuto prezzi stabili e competitivi grazie a bassi costi operativi del nucleare una volta ammortizzati i costi iniziali, capacità di fornire energia continua e prevedibile nel tempo, riducendo la dipendenza da fonti intermittenti e limitando l'esposizione alle fluttuazioni dei prezzi dei combustibili fossili. Anche l'Ungheria, con il 51% di energia elettrica ricavata dall'utilizzo di centrali nucleari, presenta costi e prezzi bassi e competitivi rispetto alla media UE. In questi Paesi è stato importante l'*input* definito dal governo a seguito di incentivi e particolare attenzione all'ambiente. Da qui si può concludere che:

- le fonti rinnovabili hanno costi marginali bassi, ma richiedono significativi investimenti iniziali e costi di *backup* o accumulo per compensare l'intermittenza;
- per il nucleare, sebbene l'investimento iniziale sia elevato, il costo operativo è più stabile, garantendo prezzi più prevedibili e competitivi a lungo termine.

Questi esempi dimostrano che una maggiore quota di energia rinnovabile non garantisce necessariamente prezzi più bassi per i consumatori finali, mentre l'energia nucleare si conferma una delle fonti più stabili e sicure dal punto di vista economico-sociale. Tuttavia, entrambe le fonti necessitano di una visione di lungo termine che tenga conto di variabili complesse come innovazione tecnologica, integrazione delle reti e sostenibilità ambientale. Certo è che oltre alla fonte di produzione, vi sono altre variabili che influenzano i prezzi dell'energia, come le politiche fiscali, la geopolitica (la dipendenza da importazioni di gas o petrolio può rendere i prezzi più volatili, come osservato durante la crisi energetica del 2022), mercati regionali e domanda stagionale.

Questa analisi è avvalorata dai dati europei in argomento forniti da “Eurostat”, l'Ufficio statistico dell'UE che raccoglie ed elabora direttamente i dati provenienti dagli Stati membri. Pertanto, si consiglia l'analisi delle Figura.7 e Figura.8, proposte alla pagina successiva.

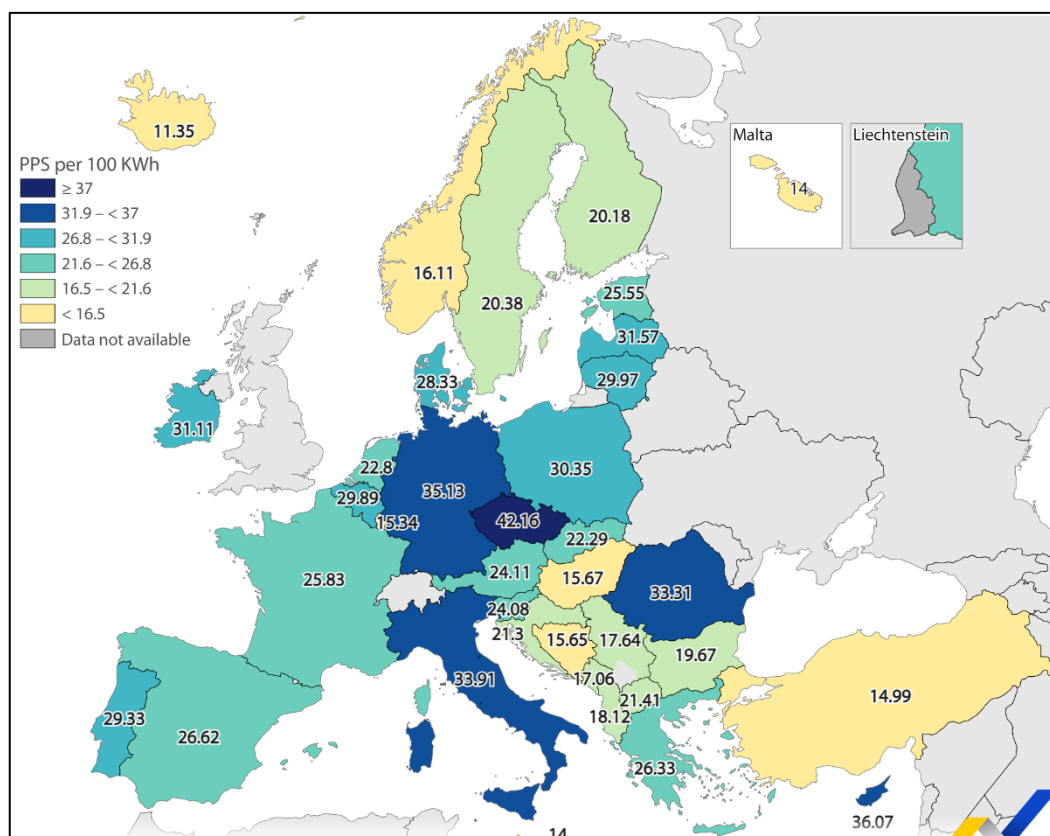


Figura.7 – Fonte Eurostat. Prezzi in bolletta pagati dai consumatori.

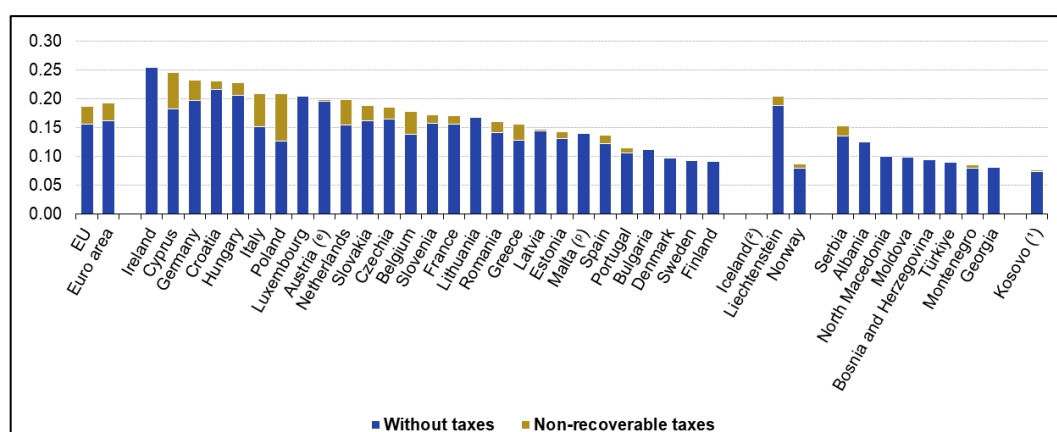


Figura.8 – Fonte Eurostat. Prezzi in bolletta pagati dalle industrie.

Le Figura.7 e Figura.8 evidenziano come i prezzi dell'elettricità siano fortemente influenzati da fattori come:

- mix energetico: paesi con nucleare (Francia, Ungheria) tendono ad avere prezzi più bassi;



- politiche fiscali: paesi con elevate accise e oneri di sistema (Germania, Danimarca) registrano prezzi più alti;
- struttura del mercato: la liberalizzazione dei mercati energetici e la dipendenza da importazioni energetiche incidono significativamente sui costi finali.

In sintesi, per un futuro sostenibile e sicuro, una combinazione di energia nucleare e fonti rinnovabili è fondamentale, riducendo sia l'impatto ambientale che il rischio per la salute umana.

**LCOE e VALCOE.** Tornando ora sul tema dei costi di produzione dell'energia, esso è cruciale nel dibattito sulle politiche energetiche globali, soprattutto in un periodo storico caratterizzato da transizione energetica e obiettivi di decarbonizzazione. A questo punto, si rende necessaria l'introduzione di due indicatori essenziali per stimare il costo esatto della produzione di energia: il LCOE (*Levelized Cost of Energy*) e il VALCOE (*Value-Adjusted LCOE*). Il LCOE rappresenta il costo medio livellato per la produzione di energia durante l'intero ciclo di vita di un impianto, includendo tutti i costi ad esso connessi. Secondo i dati più aggiornati dell'IEA (*International Energy Agency*) e del "*World Nuclear Association*", il nucleare continua a offrire un LCOE competitivo rispetto alle altre tecnologie, come il solare e l'eolico. Il VALCOE è una misura più avanzata che integra il valore dell'energia prodotta, integrando ai parametri del LCOE, anche l'affidabilità e la stabilità delle fonti, la flessibilità e il costo marginale della rete. Secondo l'analisi del "*MIT Energy Initiative*", nel 2024 il nucleare ha un VALCOE significativamente superiore rispetto alle rinnovabili intermittenti, specialmente in mercati con infrastrutture energetiche mature, studio che conferma i dati osservati dal "*World Economic Forum*" (WEF) l'anno prima. Questo vantaggio diventa evidente nei sistemi energetici che devono soddisfare una domanda crescente o adattarsi a emergenze climatiche. Pertanto, l'energia nucleare, grazie alla combinazione di un LCOE competitivo, un VALCOE e un capacity factor superiori alle rinnovabili, si posiziona come una delle soluzioni più efficienti per la produzione stabile, sicura e pulita di energia elettrica.

Tuttavia, la scelta tra fonti deve essere basata su contesti regionali, esigenze energetiche e strategie climatiche, promuovendo un mix energetico diversificato che integri nucleare e rinnovabili per un futuro sostenibile.

**Considerazioni finali.** Dall'analisi appena conclusa, purtroppo è oggettivo che il modo più profittevole di generare energia rimangono le fonti fossili, con costi e prezzi fin troppo competitivi sul mercato, nonostante siano altrettanto oggettivi la loro pericolosità e il loro pessimo impatto ambientale. Questo accade a causa di incentivi statali ormai datati e i pochi investimenti in infrastrutture più *green*, rallentando il processo di transizione ecologica. Si pensi che nel 2024 il 73% delle emissioni globali di GHG derivano da fonti fossili, raggiungendo il massimo storico di 37,4 GtCO<sub>2</sub>e, lo 0,8% in più rispetto al 2023. Nello stesso anno, le fonti di produzione di energia basate su combustibili fossili hanno coperto il 60% del fabbisogno mondiale, solo il 30% è stato coperto con fonti rinnovabili e il restante 10% con l'uso del nucleare. L'Italia produce il 60% dell'energia con fonti fossili e il 40% con rinnovabili, gli Stati Uniti producono 68% della loro energia con i fossili, il Regno Unito il 64%, la Germania il 59%, Spagna e Portogallo il 40%, la Cina l'85%, la Russia il 66%, l'India l'80%, il Giappone l'85% e l'Australia l'87%. Nonostante questi dati preoccupanti, negli ultimi 30 anni, il settore delle rinnovabili è cresciuto e quello dei fossili diminuito nei paesi a medio-alto reddito, a discapito dei paesi del terzo mondo ancora notevolmente dipendenti dai combustibili fossili, questo anche a causa dell'assenza di aiuti da parte delle maggiori istituzioni internazionali. Questo sottolinea la necessità di accelerare ulteriormente l'adozione di fonti energetiche pulite e di implementare politiche più efficaci per ridurre le emissioni e contrastare il cambiamento climatico. È fondamentale che i governi rivedano le politiche energetiche, eliminando gradualmente i sussidi per i combustibili fossili e incentivando le energie rinnovabili.

### 1.3 Bitcoin ed energia nucleare

---

L'energia nucleare è stata proposta come una soluzione sostenibile per il mining di Bitcoin, capace di ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> associate a queste attività. Studi recenti hanno esplorato l'uso dell'energia nucleare nel mining di Bitcoin, evidenziando il suo potenziale nel ridurre significativamente le emissioni di gas clima alteranti associati a queste attività. Il costo e i prezzi relativamente bassi dell'energia nucleare rendono questa soluzione economica e sostenibile per le operazioni di mining su larga scala. Tuttavia, l'adozione del nucleare richiede ulteriori ricerche e investimenti per ottimizzare il suo utilizzo nel settore dei cryptoasset. Da un lato, il mining di Bitcoin, pur essendo spesso criticato per l'alto consumo energetico, si orienta sempre più verso l'utilizzo di fonti rinnovabili e metodi di compensazione delle emissioni (oggi giorno è l'industria più green esistente al mondo, con oltre il 60% di consumo energetico proveniente da fonti rinnovabili il cui 20% è carbon negative). Dall'altro, il nucleare è considerato una fonte energetica a basso impatto di CO<sub>2</sub> e metano<sup>40</sup> che potrebbe svolgere un ruolo fondamentale nel supportare le reti elettriche nazionali, fornendo energia stabile e riducendo la dipendenza dai combustibili fossili.

**Sinergia.** La sinergia<sup>41</sup> tra energia nucleare e il mining di Bitcoin sta guadagnando consenso a livello globale per diverse ragioni tecniche, economiche e ambientali. L'energia nucleare è una delle fonti energetiche con le emissioni più basse di CO<sub>2</sub> per kWh prodotto. "Our World in Data" afferma che le emissioni totali dell'energia nucleare si attestano intorno ai 6 gCO<sub>2</sub>e per kWh (considerando l'intero ciclo di vita), valori significativamente inferiori rispetto alle fonti fossili come il carbone (970 gCO<sub>2</sub>/kWh) o il gas naturale (440 gCO<sub>2</sub>/kWh). Ciò la rende una delle tecnologie più efficienti per decarbonizzare settori ad alta intensità energetica come il mining di Bitcoin.

---

<sup>40</sup> Il metano è 85 volte più inquinante della CO<sub>2</sub> su un arco temporale di 20 anni, anche se l'anidride carbonica permane nell'atmosfera per migliaia di anni mentre il metano inizia a scomparire dopo in circa 15 anni. Dati ISPRA.

<sup>41</sup> Come evidenziato anche dal paper scientifico di S. Yuksel, H. Dincer, C. Caglayan, G. S. Uluer & A. Lisin, "Bitcoin Mining with Nuclear Energy" (2022), emerald insight (Discover Journals, Books & Case Studies).

A differenza delle fonti rinnovabili intermittenti, come solare ed eolico, l'energia nucleare fornisce una produzione costante di energia, migliorando la stabilità della rete elettrica. Questo aspetto è fondamentale per il mining di Bitcoin, un'industria che richiede energia ininterrotta e a basso costo per ottimizzare le operazioni e mantenere la competitività. Il LCOE nucleare è relativamente competitivo, specialmente in impianti esistenti. Secondo l'IEA, il LCOE per l'energia nucleare è di circa 70\$-100\$ per MWh, posizionandosi come una soluzione economicamente sostenibile rispetto al gas naturale o al carbone. Questo rende il nucleare ideale per alimentare mining farm su larga scala che richiedono una fornitura energetica continua a basso costo marginale. Integrare il nucleare nel settore del mining consente di diversificare il mix energetico nazionale, riducendo la dipendenza dai combustibili fossili e migliorando la resilienza energetica. Questo è particolarmente rilevante in aree con uno scarso accesso a fonti rinnovabili intermittenti o vulnerabili alle fluttuazioni dei prezzi del gas naturale e con un accesso finanziario limitato. Tutto questo garantirebbe anche la bancarizzazione di molte persone grazie all'inserimento di Bitcoin nell'economia statale.

**Sfide.** Nonostante i benefici, l'integrazione tra Bitcoin ed energia nucleare presenta alcune sfide, tra cui la percezione pubblica negativa e le rigorose normative sulla sicurezza nucleare inducono di un freno alla diffusione del nucleare in molte giurisdizioni. Tuttavia, l'urgenza di raggiungere obiettivi climatici ha portato a una riabilitazione del nucleare come strumento di transizione energetica. Inoltre, non tutti i Paesi possiedono infrastrutture nucleari o risorse finanziarie per adottare questa tecnologia. Tuttavia, in Stati con impianti nucleari esistenti (Francia, Stati Uniti), il nucleare può svolgere un ruolo primario nell'alimentare operazioni di mining. L'energia nucleare offre un potenziale significativo per decarbonizzare il mining di Bitcoin, fornendo energia stabile, competitiva e a basso impatto ambientale. L'integrazione tra Bitcoin ed energia nucleare rappresenta una sinergia strategica che affronta due sfide cruciali: la decarbonizzazione della produzione energetica e la stabilità delle reti elettriche. Con ulteriori investimenti in reattori modulari, incentivi adeguati e una normativa favorevole, il nucleare potrebbe diventare una soluzione chiave per garantire un futuro sostenibile al settore del mining di Bitcoin (si veda la Tabella.2 alla pagina successiva).

Tabella.2 – Sintesi delle relazioni tra Bitcoin ed energia nucleare con rielaborazione interna.

Aspetti	Relazioni con l'ambiente	Potenziali benefici ambientali	Sfide correlate
<b>Bitcoin: consumo energetico</b>	Consumo strettamente legato alla difficoltà del mining e al prezzo del bitcoin, con crescita nelle regioni non regolamentate.	Aumento dell'utilizzo di fonti rinnovabili (oltre il 60% in alcune regioni come USA e Canada).	Elevati consumi energetici in regioni prive di regolamentazioni adeguate.
<b>Bitcoin: emissioni di GHG</b>	Emissioni significative in aree dove le reti elettriche sono alimentate prevalentemente da combustibili fossili.	Riduzione potenziale con l'adozione di regolamentazioni, incentivi per rinnovabili e hardware più efficienti.	Assenza di standard globali; difficoltà nel monitoraggio dell'impatto ambientale.
<b>Nucleare: produzione energetica</b>	Stabile, con emissioni di GHG trascurabili durante il funzionamento, supporto ideale per attività energivore come il mining.	Riduzione della dipendenza da combustibili fossili; stabilità nella fornitura energetica su scala globale.	Altri costi di costruzione; gestione sicura del combustibile esausto.
<b>Nucleare: emissioni di GHG</b>	Le emissioni sono concentrate nel ciclo di vita (costruzione, decommissioning), ma quasi nulle durante l'operatività.	Contributo fondamentale alla decarbonizzazione e alla riduzione dell'impatto ambientale globale.	Investimenti iniziali elevati; percezione pubblica sfavorevole.
<b>Bitcoin: efficienza energetica</b>	Varia significativamente in base all'hardware utilizzato (ASIC avanzati) e alla posizione geografica delle operazioni.	Incremento possibile con regolamentazioni sull'adozione di hardware più efficiente e sostenibile.	Obsolescenza rapida dei dispositivi; barriere tecnologiche per l'aggiornamento.
<b>Nucleare: efficienza energetica</b>	Elevata, con capacità di operare al massimo (>90% di capacity factor) per lunghi periodi senza interruzioni.	Complementare alle energie rinnovabili; garanzia di stabilità per sistemi elettrici avanzati.	Necessità di infrastrutture avanzate per l'integrazione nel mix energetico.
<b>Sinergia: Bitcoin e nucleare</b>	Il nucleare può rendere il mining di Bitcoin più sostenibile, garantendo energia stabile e a basse emissioni di GHG.	Sviluppo di progetti innovativi che combinano nucleare e mining per ridurre le emissioni globali.	Complessità nelle normative internazionali; costi per infrastrutture dedicate.

## 1.4 Casi studio nel mondo

---

I seguenti casi studio sono suddivisi in tre sottocategorie: una dedicata a Bitcoin, una all'energia nucleare ed un'ultima sezione a Bitcoin ed energia nucleare integrati. Essi sono utili per avere toccare con mano l'impatto che queste due tecnologie hanno nel mondo, sottolineandone vantaggi e svantaggi.

### Bitcoin: progetti e iniziative pratiche.

#### 1. Gridless<sup>42</sup> (Kenya e Africa Subsahariana):

Gridless utilizza energia idroelettrica in eccesso nelle comunità rurali del Kenya per alimentare il mining di Bitcoin, creando un modello di sviluppo sostenibile. Questo progetto non solo ottimizza l'uso di risorse energetiche locali, ma reinveste i profitti del mining nelle comunità, migliorando l'accesso all'elettricità e sostenendo l'economia locale. Gli impatti di questo modello di business sono: la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> grazie all'uso di energia idroelettrica, la creazione di posti di lavoro, l'accesso energetico per le comunità rurali e la possibilità di avere accesso a servizi finanziari per la popolazione locale, prima del tutto unbanked.

#### 2. Etiopia (Africa):

L'Etiopia sta trasformando il surplus energetico della Grande Diga del Rinascimento (GERD) in una fonte di ricchezza attraverso il mining di Bitcoin. Secondo i dati riportati da *"The Africa Report"*, l'attività sta generando il 18% delle entrate nazionali. Nell'ultimo anno gli investimenti nel mining, superiori al miliardo di dollari, hanno superato i profitti derivanti dall'esportazione di energia nei Paesi limitrofi. L'Etiopia ha già siglato accordi con 25 società di mining, generando oltre 55 milioni di dollari di ricavi negli ultimi dieci mesi. Tale successo è attribuibile anche alle tariffe elettriche estremamente competitive del Paese, che si attestano a circa 3,20 centesimi di dollaro per kWh.

---

<sup>42</sup> Si rende il sito ufficiale <https://gridlesscompute.com/>.

3. Upstream data<sup>43</sup> (Canada):

Alcune aziende di mining del Paese, tra cui “Upstream data” stanno sfruttando il gas naturale in eccesso prodotto durante le operazioni di flaring e venting<sup>44</sup>. Queste pratiche sono state convertite in opportunità per alimentare il mining. Invece di sprecare il gas, esso viene utilizzato per generare energia elettrica necessaria per le operazioni di mining, riducendo così le emissioni di gas serra e trasformando un sottoprodotto dell'industria petrolifera in una risorsa economica sostenibile. In queste casistiche (26 aziende al mondo), l'intera industria di mining alimentato in questo modo diventa per il 20% carbon negative.

4. Hut 8 Mining<sup>45</sup> (Canada):

Una delle principali aziende di mining di Bitcoin in Canada, “Hut 8 Mining”, si impegna ad utilizzare energia rinnovabile (idroelettrica e solare) per alimentare le sue operazioni, dimostrando che il mining di Bitcoin può essere compatibile con gli obiettivi di sostenibilità ambientale. I principali impatti sono: la riduzione del consumo di energia da fonti fossili e la promozione di regolamentazioni locali per incentivare l'uso di energie rinnovabili nel settore degli asset digitali.

5. Progetto Makai<sup>46</sup> (Hawaii):

Il progetto è un'iniziativa che mira a sfruttare l'energia termica oceanica (OTEC) per il mining di Bitcoin. Utilizzando la differenza di temperatura tra le acque superficiali calde e quelle fredde nelle profondità dell'oceano, Makai genera energia rinnovabile abbondante e sostenibile.

Il progetto era già stato studiato nel 1880, ma la sua applicazione risultava impossibile perché il mancato guadagno dato da una bassa vendita per una domanda troppo bassa non rendeva il progetto economicamente sostenibile.

---

<sup>43</sup> Si rende il sito ufficiale <https://upstreamdata.com/>.

<sup>44</sup> Il gas venting comporta il rilascio diretto nell'atmosfera del gas naturale, principalmente metano. La pratica (assieme a quella di flaring) contribuisce significativamente alle emissioni di gas serra e rappresenta una perdita di risorse energetiche preziose.

<sup>45</sup> Si rende il sito ufficiale <https://hut8.com/>.

<sup>46</sup> Come evidenziato dal paper scientifico di J. O'Hare, A. Fairchild & U. Ali, “Money & Trust in Digital Society – Bitcoin, Nostr, Stablecoins, Digital Object and Machine Learning in B2B Telepresent Mixed Reality” (2023), ResearchGate.

Bitcoin ha colmato questo *gap* dando l'input economico per generare energia rinnovabile sostenibile.

6. ERCOT e miner in Texas<sup>47</sup>:

Il mining di Bitcoin sta aiutando a prevenire *blackout* (frequenti in Texas), collaborando con l'ERCOT, l'ente che gestisce la rete elettrica texana. I miner utilizzano grandi quantità di energia, ma possono modulare rapidamente le loro operazioni in caso di picchi di domanda elettrica. Ciò consente all'ERCOT di stabilizzare la rete durante i periodi critici, prevenendo blackout e garantendo un approvvigionamento energetico più stabile, specialmente in condizioni climatiche critiche, purtroppo frequenti nel Paese.

7. CleanSpark<sup>48</sup>, Norcross (Georgia):

L'*immersion cooling*<sup>49</sup> sta rivoluzionando il mining di Bitcoin, e la mining farm di *CleanSpark* a *Norcross* in Georgia, ne è un esempio concreto. La mining farm è al 100% carbon neutral, utilizzando un fluido dielettrico<sup>50</sup> per raffreddare gli ASIC, migliorando le prestazioni, riducendo i costi energetici del 40% e aumentando la sostenibilità. Questa tecnologia all'avanguardia abbate lo spreco di energia per il raffreddamento, estende la vita delle apparecchiature e rende il mining più efficiente e sostenibile, riducendo anche l'inquinamento acustico.

8. Parco Nazionale di Virunga<sup>51</sup> (Congo):

Il Parco ha avviato un progetto di mining di Bitcoin per finanziare la conservazione del parco e sostenere le comunità locali. L'iniziativa utilizza il *surplus* energetico per il mining di Bitcoin.

I fondi generati sono destinati alla protezione della biodiversità del parco e forniscono anche supporto economico alle popolazioni circostanti, garantendo una fonte di finanziamento sostenibile.

---

<sup>47</sup> Di cui <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=63344>.

<sup>48</sup> Si rende il sito ufficiale <https://www.cleanspark.com/>.

<sup>49</sup> Come evidenziato anche dal paper scientifico di N. Chen, Y. Chen & H. Zhao, “*Heat Recovery from Cryptocurrency Mining by Liquid Cooling Technology*” (2022), ResearchGate.

<sup>50</sup> Un fluido dielettrico è una sostanza liquida isolante che non conduce elettricità, utilizzata per raffreddare e proteggere apparecchiature elettroniche.

<sup>51</sup> Si rende il sito ufficiale <https://virunga.org/>.



9. El Salvador, il Vulcanode<sup>52</sup>:

Il primo Paese a adottare Bitcoin come valuta locale. Ha introdotto l'idea del “*Vulcanode*”, una centrale di mining alimentata da energia geotermica proveniente dai vulcani presenti nei confini statali. Questo progetto sfrutta l'energia rinnovabile e abbondante dei vulcani per alimentare il mining in modo sostenibile. L'iniziativa fa parte di un piano del governo per sviluppare l'infrastruttura di Bitcoin al fine di attirare investimenti esteri e creare nuove opportunità economiche attraverso l'uso dell'energia pulita.

10. Bhutan:

Il Paese ha avviato un progetto di mining di Bitcoin sfruttando l'abbondante energia idroelettrica dello stesso per alimentare le operazioni. L'energia pulita e rinnovabile del Bhutan permette di condurre il mining in modo sostenibile, senza aumentare le emissioni di carbonio. I profitti generati dal mining sono destinati a diversificare l'economia dello Stato e sostenere il benessere economico dello stesso.

11. Marathon Digital Holdings<sup>53</sup>:

“*Marathon Digital Holdings*” sta dimostrando come il calore prodotto dall'attività di mining possa trasformarsi in una preziosa risorsa per la comunità. A dicembre 2024 l'azienda ha annunciato che il calore generato dalle sue operazioni sta attualmente riscaldando circa 80.000 abitazioni in Finlandia. Il progetto, partito a giugno dello stesso anno con un programma pilota che serviva 11.000 case nella regione di *Satakunta*, si è rapidamente espanso fino a raggiungere altri 67.000 residenti. Il sistema utilizza la tecnologia del teleriscaldamento, che permette di distribuire il calore attraverso una rete di tubature sotterranee, convertendo quello che era considerato uno spreco in una risorsa per la città.

---

<sup>52</sup> Si rende il sito ufficiale <https://volcano.energy/en/home/>.

<sup>53</sup> Si rende il sito ufficiale <https://www.mara.com/>.

12. Cina<sup>54</sup>:

Nel 2021 la Cina, per motivi politici, ha ufficialmente bandito il mining di Bitcoin. In realtà, questo è vero solo sulla carta, poiché oggi è noto come circa il 55% dell'hashrate provenga dal Paese (il 40% dagli USA), quando nel 2022 rappresentava solo il 21%. La Cina è un Paese ricchissimo di energia, con numerose centrali idroelettriche situate su corsi d'acqua che generano la maggior parte di energia durante le piogge torrenziali, molto frequenti nello Stato, abbassando il costo della corrente elettrica durante quei periodi e registrando un eccesso di produzione che viene sperperato. Ed è qui che Bitcoin si inserisce. Una proprietà intrinseca del mining è proprio quella di seguire l'energia a basso costo, di insediarsi là dove c'è surplus energetico che andrebbe perso e di generare un bene assolutamente scarso e digitale, quindi creare valore, sia sociale che economico.

13. Alps Blockchain<sup>55</sup> (Italia):

Nel 2018 l'azienda si colloca in una centrale idroelettrica nei pressi del Monte Bianco data la presenza di problemi di trasmissione di energia. La centrale non riusciva a vendere sul mercato tutta l'energia e dunque ne sprecava una buona parte. Alps Blockchain, con il mining di Bitcoin, si inserisce nella centrale rendendo profittevole sia il business della centrale stessa sia il loro. Inoltre, oggi, minimizza la dispersione di rete dalla trasmissione di energia collocandosi direttamente presso la fonte di produzione, il tutto controllato tramite una SIM del cellulare. Attualmente, Alps Blockchain è arrivata in 32 centrali idroelettriche di tutto il nord Italia, partecipando anche alla costruzione di 3 di queste, spostandosi anche in Paraguay, dove l'energia prodotta proviene al 100% da fonti idroelettriche, in Ecuador e nella Foresta Amazzonica, sempre sfruttando l'idroelettrico.

---

<sup>54</sup> Come evidenziato anche dai paper scientifici di S. Jiang, Y. Li, Q. Lu & Y. Hong, “*Policy Assessments for the Carbon Emission Flows and Sustainability of Bitcoin Blockchain Operation in China*” (2020), ResearchGate; B. Xie, “*Environmental Consequences of Mining Bitcoin: The Carbon Emission in China*” (2022), ResearchGate.

<sup>55</sup> Si rende il sito ufficiale <https://www.alpsblockchain.com/>.

## Energia nucleare: progetti e casi studio.

### 1. Energia nucleare in Francia:

La Francia è un caso emblematico di integrazione dell'energia nucleare nel mix energetico nazionale, con oltre il 70% della produzione elettrica derivante da centrali nucleari. Il paese si è impegnato a rinnovare e modernizzare le sue infrastrutture nucleari per sostenere la transizione energetica. Di conseguenza la Francia ha ottenuto neutralità climatica e la riduzione della dipendenza dalle importazioni di gas e petrolio.

### 2. Small Modular Reactors (SMR) in Canada<sup>56</sup>:

Il Canada è leader nello sviluppo e nell'implementazione di SMR, con progetti pilota come quello di “*Ontario Power Generation*”<sup>57</sup>, che mira a costruire il primo SMR operativo entro il 2030. Questi reattori, oltre ad essere più sicuri, offrono una soluzione flessibile e scalabile per soddisfare la domanda energetica in aree remote. Gli impatti dell'iniziativa riguardano la bassa impronta di carbonio e la riduzione dei costi di implementazione rispetto ai reattori tradizionali

### 3. Reattori ad alta temperatura raffreddati a gas (HTGR) in Cina:

Questi reattori utilizzano elio come refrigerante e sono progettati per funzionare a temperature molto elevate, rendendoli ideali per applicazioni industriali come la produzione di idrogeno e il mining di Bitcoin. L'energia ad alta efficienza può essere integrata con reti ibride di rinnovabili e nucleare, riducendo le emissioni di CO<sub>2</sub>. La Cina ha sviluppato e messo in funzione il primo reattore nucleare commerciale ad alta temperatura raffreddato a gas, l'HTR-PM, situato a *Shidao Bay*. Questo reattore di quarta generazione offre maggiore sicurezza intrinseca e può operare a temperature elevate, rendendolo adatto non solo alla produzione di elettricità, ma anche a processi industriali che richiedono calore ad alta temperatura.

---

<sup>56</sup> Sito ufficiale disponibile a <https://www.canada.ca/en/natural-resources-canada/news/2024/10/government-of-canada-advances-small-modular-reactor-research-and-development-with-136-million-investment.html>.

<sup>57</sup> Sito ufficiale disponibile a <https://www.opg.com/projects-services/projects/nuclear/smr/darlington-smr/>.

4. Reattori veloci a sodio (SFR - *Sodium Fast Reactors*):

Questi reattori utilizzano sodio liquido come refrigerante, consentendo un uso più efficiente del combustibile nucleare. Sono in grado di “bruciare” gli attinidi<sup>58</sup> a lunga vita presenti nelle scorie nucleari, riducendo la quantità di rifiuti generati.

5. Reattori a sali fusi (MSR - *Molten Salt Reactors*):

I reattori a sali fusi rappresentano una delle tecnologie più promettenti. Utilizzano un liquido di sali fusi come refrigerante, che opera a temperature più elevate rispetto ai reattori convenzionali, aumentando l'efficienza termica. Sono considerati più sicuri, poiché il combustibile è disciolto nel sale e non è soggetto a fusione.

6. Progetto ITER<sup>59</sup> (Internazionale):

L'“*International Thermonuclear Experimental Reactor*” (ITER) è uno dei più ambiziosi progetti energetici globali, volto a dimostrare la fattibilità della fusione nucleare come fonte di energia pulita e inesauribile. Situato a *Cadarache*, in Francia, ITER coinvolge la collaborazione di 35 nazioni e mira a produrre plasma in grado di generare 500 MW di potenza termica da un input di 50 MW, con un rapporto di guadagno energetico di 10:1.

**Bitcoin ed energia nucleare: sinergie.**

1. Oklo Inc.<sup>60</sup> (Stati Uniti):

“*Oklo Inc.*” sta sviluppando microreattori nucleari per alimentare operazioni di mining di Bitcoin, combinando due tecnologie innovative per ridurre significativamente le emissioni di CO<sub>2</sub> associate al mining. Gli effetti della combinazione interessano il mining che diventa carbon neutral a lungo termine e, conseguentemente, registra una riduzione dei costi e dei prezzi energetici per i miner grazie all'efficienza nucleare.

---

<sup>58</sup> Gli attinidi sono elementi noti per essere radioattivi. Essi includono uranio e plutonio e sono utilizzati anche come combustibile nucleare nel processo di riciclo.

<sup>59</sup> Sito ufficiale disponibile a <https://www.iter.org/>.

<sup>60</sup> Sito ufficiale disponibile a <https://www.oklo.com/overview/default.aspx>.

2. Tennessee Valley Authority e CleanSpark (USA):

CleanSpark è un esempio di mining sostenibile, grazie all'ampliamento delle sue operazioni con fonti energetiche rinnovabili e all'acquisizione di GRID, che ha permesso di sfruttare infrastrutture esistenti e accedere alla “*Tennessee Valley Authority*”, migliorando l'efficienza e riducendo i costi operativi. La scelta del Tennessee come centro operativo rappresenta una strategia di diversificazione e adattabilità a lungo termine, che posiziona CleanSpark come un leader nel mining sostenibile di Bitcoin. L'azienda utilizza l'energia nucleare generata dalla Tennessee Valley Authority per alimentare le sue operazioni di mining, dimostrando che l'energia nucleare può essere un'opzione sostenibile per il settore dei cryptoasset. Ciò genera un'integrazione di un mix energetico pulito e la successiva creazione di un modello replicabile in altre regioni.

3. TeraWulf<sup>61</sup> e Nautilus Cryptomine<sup>62</sup> (Stati Uniti):

“*TeraWulf*”, una società statunitense di mining di Bitcoin, ha avviato una *joint venture* con “*Cumulus Coin*” per sviluppare il “*Nautilus Cryptomine*”, un impianto di mining alimentato da energia nucleare. Situato in Pennsylvania, l'impianto prevede di utilizzare fino a 200 MW di energia nucleare, con l'obiettivo di operare in modo sostenibile e a basso costo energetico.

4. BitRiver<sup>63</sup> e Rosatom<sup>64</sup> (Russia):

“*BitRiver*”, uno dei principali operatori di *data center* per il mining di cryptoasset in Russia, ha stretto una partnership con “*Rosatom*”, l'agenzia statale russa per l'energia nucleare, per alimentare le sue operazioni di mining utilizzando energia nucleare. Questa collaborazione mira a fornire energia stabile e a basso costo, riducendo al contempo l'impronta di carbonio del mining di Bitcoin. Nella collaborazione si studia l'utilizzo degli SMR per alimentare data center e attività di mining di Bitcoin in regioni remote. Questa iniziativa mira a sfruttare la capacità nucleare esistente per supportare economie locali senza contribuire all'aumento delle emissioni di carbonio.

---

<sup>61</sup> Sito ufficiale disponibile a <https://www.terawulf.com/>.

<sup>62</sup> Sito ufficiale disponibile a <https://cumuluscoin.com/>.

<sup>63</sup> Sito ufficiale disponibile a <https://bitriver.com/>.

<sup>64</sup> Sito ufficiale disponibile a <https://rosatom-renewables.ru/eng/>.

È un esempio di come l'energia nucleare possa essere utilizzata strategicamente per sviluppare infrastrutture tecnologiche senza impatti significativi sull'ambiente e contribuire alla creazione di scarsità digitale.

#### 5. Africa meridionale:

Alcuni progetti in Sudafrica mirano a combinare l'energia nucleare con il mining per sfruttare al meglio i reattori nucleari esistenti. L'energia prodotta, spesso in eccesso rispetto alla domanda locale, potrebbe essere utilizzata per alimentare attività digitali, migliorando le economie regionali e offrendo una soluzione innovativa per lo sviluppo sostenibile. Si pensi che il 49% della popolazione africana vive senza accesso alla corrente elettrica (dato del WEF). Questi progetti potrebbero mitigare questo dato allarmante.

**Conclusioni.** Con questo primo capitolo si è cercato di fornire una panoramica esaustiva della letteratura esistente, analizzando gli aspetti critici e benevoli del mining di Bitcoin e dell'energia nucleare nel contesto della sostenibilità ambientale, dell'efficienza energetica e dell'innovazione tecnologica. Gli studi evidenziano come queste due tecnologie, seppur apparentemente distanti, possano convergere verso un modello energetico più sostenibile. Sono state analizzate le emissioni di GHG, i consumi, i costi e i prezzi dell'energia, molti Stati in cui Bitcoin è utilizzato come valuta legale, Stati nei quali il mining è una realtà ormai affermata, si è tenuto conto della ricchezza degli Stati, dell'impatto di politiche regolamentari in materia di asset finanziari ed inquinamento, sono stati ampiamente discussi i diversi mix energetici di molte nazioni, formati dalle tre forme in cui l'energia è ricavata (nucleare, rinnovabili e fossili). Questi elementi insieme costituiscono la base per l'analisi successiva, che approfondirà l'impatto di tali fattori sul contesto ambientale globale attraverso un'analisi econometrica.

## 2. Modello economico

---

Arrivati a questo punto, dopo aver analizzato la letteratura esistente in materia di Bitcoin ed energia nucleare, è opportuno introdurre il modello che verrà adottato nella fase successiva dell'elaborato<sup>65</sup>. Questo studio si propone di evidenziare come Bitcoin abbia un impatto ambientale contenuto e come l'energia nucleare rappresenti, ad oggi, una delle fonti energetiche più pulite e sicure. L'idea di fondo è che la sinergia di queste due tecnologie possa contribuire alla decarbonizzazione, alla riduzione degli sprechi, all'attenuazione delle disuguaglianze economico-sociali, ad una maggiore consapevolezza sul tema dell'approvvigionamento energetico e sul tema del drastico cambiamento climatico in corso. Per suffragare tali ipotesi, si è proceduto all'analisi di dati appositamente raccolti ed elaborati, la cui discussione guiderà il lettore alle conclusioni finali. A tal fine, sono state svolte le seguenti attività preliminari:

1. È stata condotta un'approfondita ricerca volta alla raccolta dei dati, poi opportunamente manipolati e organizzati per costituire un *dataset* utile a trarre conclusioni e validare le ipotesi di partenza.
2. Dopo un'attenta analisi, sono state individuate le variabili giudicate maggiormente significative e adeguate agli scopi dello studio.
3. Le unità statistiche considerate nel successivo studio econometrico sono i Paesi del mondo, nel periodo dal 2009 al 2024, poiché il 2009 coincide con l'avvio di Bitcoin, mentre gli ultimi dati disponibili risalgono al 2024 (alcuni valori sono stati stimati mediante interpolazione lineare). L'intervallo temporale permette di analizzare l'andamento delle emissioni di GHG, individuandone le cause e formulando possibili strategie di riduzione. Le unità statistiche selezionate (171 Paesi, per i 16 anni considerati) generano un totale di 2736 osservazioni.

---

<sup>65</sup> Per ogni tipo di termine tecnico è possibile chiarire il significato da una rapida ricerca online o dalla lettura inerente del libro J. H. Stock & M. W. Watson, F. Peracchi, “*Introduzione all'econometria*” (2020), 5ª edizione, Pearson Italia SPA, presente nella bibliografia.

## 2.1 Variabili e assunzioni del modello

Nonostante le difficoltà incontrate nella reperibilità di alcuni dati, ora è possibile definire e illustrare le motivazioni e le modalità di utilizzo delle variabili selezionate.

Variabile	Definizione, uso e motivazione
ghg	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Definizione</i>: emissioni di GHG annuali misurate in MtCO<sub>2</sub>e, stima che include la quantità di riscaldamento prodotta da ciascun gas serra emesso dall'uomo. Dati ottenuti dal <i>database</i> di Our World in Data.</li> <li>- <i>Uso</i>: variabile dipendente (<i>Y</i>) sulla quale si proporranno le trasformazioni matematiche più significative ai fini dell'analisi.</li> <li>- <i>Motivazione</i>: le emissioni di GHG di origine antropica rappresentano la principale causa del cambiamento climatico globale. Scegliere questa variabile come dipendente permette di esaminare i fattori che ne influenzano i livelli e la relazione con le altre variabili, al fine di individuare possibili soluzioni di mitigazione, considerato l'incremento costante delle emissioni e le evidenti conseguenze ambientali e sociali<sup>66</sup>.</li> </ul>
nuclear	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Definizione</i>: quota di elettricità generata mediante energia nucleare, misurata come percentuale dell'elettricità totale prodotta. Dati ottenuti dal database di Our World in Data.</li> <li>- <i>Uso</i>: prima variabile indipendente (<i>X</i><sub>1</sub>) sulla quale si proporranno le trasformazioni matematiche più significative ai fini dell'analisi.</li> </ul>

<sup>66</sup> In argomento si può consultare il sito <https://www.lifegate.it/> molto attento al tema o anche l'articolo scientifico <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>.



nuclear	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Motivazione:</i> l'energia nucleare, alla luce della letteratura di riferimento e delle evidenze empiriche, emerge come un'opzione energetica strategica, a basso impatto di GHG. Questa variabile consente di verificare se un'ampia quota di nucleare nel mix energetico concorra effettivamente a ridurre le emissioni di gas serra.</li> </ul>
renewables	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Definizione:</i> Quota di elettricità generata dall'utilizzo di fonti rinnovabili, misurata come percentuale dell'elettricità totale prodotta. Dati ottenuti dal database di Our World in Data.</li> <li>- <i>Uso:</i> seconda variabile indipendente (<math>X_2</math>) usata con <math>X_1</math> o <math>X_3</math> o <math>X_4</math> o in loro sostituzione.</li> <li>- <i>Motivazione:</i> l'energia rinnovabile (solare, eolica, idroelettrica, ecc.) viene considerata il metodo più diffuso a livello mondiale per ridurre la dipendenza dai combustibili fossili. La scelta di includere questa variabile consente di valutare l'effettivo impatto "verde" delle rinnovabili e stabilire se, e in quale misura, possano contribuire a ridurre le emissioni di GHG in modo stabile ed economicamente sostenibile.</li> </ul>
fossil	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Definizione:</i> Quota di elettricità generata dall'utilizzo di fonti a combustibile fossile, misurata come percentuale dell'elettricità totale prodotta. Dati ottenuti dal database di Our World in Data.</li> <li>- <i>Uso:</i> terza variabile indipendente (<math>X_3</math>) usata con <math>X_1</math> o <math>X_2</math> o <math>X_4</math> o in loro sostituzione.</li> <li>- <i>Motivazione:</i> le fonti fossili (carbone, petrolio, gas naturale) sono tra le maggiori responsabili delle emissioni di GHG. Nonostante l'impatto negativo sul clima, eliminarle dal mix energetico è complesso, principalmente per ragioni economiche, infrastrutturali e politiche. Questa variabile serve a valutare in che modo l'incidenza dei combustibili fossili influenzi il livello di emissioni totali.</li> </ul>

consum	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Definizione</i>: i consumi dovuti all'utilizzo di energia primaria, espressi in TWh. Essi comprendono l'energia di cui l'utente finale ha bisogno, sotto forma di elettricità, trasporto e riscaldamento, oltre alle inefficienze e all'energia che si perde quando le risorse grezze vengono trasformate in una forma utilizzabile. Dati ottenuti dal database di Our World in Data.</li> <li>- <i>Uso</i>: quarta variabile indipendente (<math>X_4</math>) usata con <math>X_1</math> o <math>X_2</math> o <math>X_3</math> in loro sostituzione.</li> <li>- <i>Motivazione</i>: includere i consumi totali di energia primaria nel modello risponde all'esigenza di misurare l'impatto complessivo della domanda energetica sull'inquinamento e sull'economia. Poiché l'energia primaria è spesso alla base delle emissioni di GHG (soprattutto se proveniente da fonti fossili), è fondamentale comprendere come l'andamento dei consumi incida sulle prestazioni ambientali. Inoltre, la variabile consente di valutare il grado di efficienza o inefficienza nel processo di trasformazione energetica e l'effetto di eventuali politiche volte a moderare la crescita dei consumi totali.</li> </ul>
gdp_percapita	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Definizione</i>: il PIL pro-capite espresso in dollari internazionali correnti, convertiti tramite parità di potere d'acquisto (PPA). Il PIL è la somma del valore aggiunto lordo di tutti i produttori residenti in un Paese, più eventuali imposte sui prodotti e meno sussidi non inclusi nel valore dei prodotti. La conversione PPA funge da deflatore spaziale e convertitore di valuta, tenendo conto delle differenze di livello dei prezzi tra i Paesi. Dati ottenuti dal database di World Bank.</li> <li>- <i>Uso</i>: quinta variabile indipendente usata come prima variabile di controllo (<math>C_1</math>), assieme alle tre variabili indipendenti principali.</li> </ul>

gdp_percapita	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Motivazione</i>: l'inserimento del PIL pro-capite mira a cogliere eventuali connessioni tra il reddito medio di un Paese e le emissioni di GHG, ipotizzando che un maggiore reddito possa influenzare sia il consumo energetico sia le politiche ambientali.</li> </ul>
pop	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Definizione</i>: popolazione totale di ciascun Paese, secondo la definizione <i>de facto</i>, che include tutti i residenti a prescindere dallo status giuridico o dalla cittadinanza. Dati ottenuti dal database di Our World in Data.</li> <li>- <i>Uso</i>: sesta variabile indipendente usata come seconda variabile di controllo (<math>C_2</math>), accanto alle tre variabili indipendenti principali.</li> <li>- <i>Motivazione</i>: l'obiettivo è capire se i Paesi più popolosi siano tra i maggiori responsabili delle emissioni di GHG, nonché valutare il rapporto tra densità demografica e impatto ambientale.</li> </ul>
d_bitcoin	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Definizione</i>: variabile <i>dummy</i> che assume il valore 1 se almeno l'1% della popolazione di un Paese conosce o utilizza Bitcoin, o se il Paese ha inciso in modo rilevante sul mining di Bitcoin (anche per un periodo limitato), oppure se Bitcoin rientra nelle riserve statali. Assume valore 0 in caso contrario. Variabile costruita internamente.</li> <li>- <i>Uso</i>: prima variabile indipendente dummy (<math>D_1</math>) usata come discriminante per misurare l'adozione o l'utilizzo dell'asset a livello nazionale.</li> <li>- <i>Motivazione</i>: questa variabile consente di indagare se l'adozione di Bitcoin comporti effettivi consumi energetici significativi e se, in determinati contesti, possa contribuire a ridurre le emissioni di GHG (ad esempio, incentivando l'uso di fonti più pulite).</li> </ul>

d_policy	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Definizione</i>: variabile dummy che assume valore 1 se, nell'anno considerato, lo Stato ha introdotto o attuato almeno una politica ambientale volta a ridurre o controllare le emissioni di GHG; 0 in caso contrario. Variabile costruita internamente.</li> <li>- <i>Uso</i>: seconda variabile indipendente dummy (<math>D_2</math>) usata come discriminante per cogliere l'evoluzione delle regolamentazioni ambientali di uno Stato nel tempo.</li> <li>- <i>Motivazione</i>: l'obiettivo è valutare se e in che misura le politiche ambientali adottate nei diversi Paesi siano efficaci nella riduzione delle emissioni di GHG, fornendo elementi utili a identificare eventuali aree di miglioramento o criticità.</li> </ul>
----------	---

Prima di procedere alle analisi preliminari, è opportuno precisare che le variabili indipendenti *nuclear*, *renewables* e *fossil* sono fra loro complementari. La loro somma, infatti, corrisponde al 100% della produzione totale di energia, poiché ogni Paese ricava elettricità interamente da una combinazione di esse.

## 2.2 Una prima analisi

In questo paragrafo saranno presentati i primi risultati dell'analisi del dataset predisposto, analizzando le statistiche descrittive delle variabili precedentemente discusse e la loro correlazione. I dati sono interamente trattati con l'utilizzo dei *software* di Excel e Gretl.

Tabella.3 – Statistiche descrittive principali delle 2736 osservazioni negli anni 2009-2024.

	Media	Mediana	SQM	Minimo	Massimo
<b>ghg</b>	290,46	51,236	1112,3	0,0426	13.969
<b>nuclear</b>	3,701	0	11,204	0	77,965
<b>renewables</b>	35,4	24,967	32,688	0	100
<b>fossil</b>	60,891	67,549	33,661	0	100
<b>consum</b>	866,04	71,688	3633,7	0,225	47428
<b>gdp_percapita</b>	21.803	13.552	24.047	568,61	180.939,43
<b>pop</b>	42.080.000	8.923.800	152.320.000	10.255	1.453.078.485

Tabella.4 – Statistiche descrittive supplementari delle 2736 osservazioni negli anni 2009-2024.

	Cf. variaz.	Asimmetria	Curtosi
<b>ghg</b>	3,83	8,532	83,831
<b>nuclear</b>	3,028	3,56	13,294
<b>renewables</b>	0,923	0,673	-0,865
<b>fossil</b>	0,553	-0,451	-1,152
<b>consum</b>	4,196	8,472	80,285
<b>gdp_percapita</b>	1,103	2,199	6,534
<b>pop</b>	3,62	7,88	65,519

Di seguito si propone un'analisi strutturata delle Tabella.3 e Tabella.4, da cui sono volutamente state escluse le variabili dummy ( $d\_bitcoin$  e  $d\_policy$ ) poiché le statistiche descrittive per valori di 0 e 1 non presentano un significato economico valido; saranno di primaria importanza nel momento in cui si imposterà l'analisi di regressione successiva. Gli obiettivi sono: evidenziare le principali caratteristiche numeriche, comprendere meglio la distribuzione dei dati, identificare eventuali problematiche che potranno emergere nelle fasi di modellizzazione econometrica e trarre le prime conclusioni sui dati.

#### 1. Variabile $ghg$ :

Il valore medio (290,46) è superiore alla mediana di oltre 5 volte (51,236), segnalando una distribuzione altamente asimmetrica a destra (confermata dal valore 8,532), tipica di fenomeni in cui pochi Paesi presentano emissioni molto elevate (ad esempio, economie fortemente industrializzate con grandi popolazioni), mentre la maggior parte dei Paesi registra valori più contenuti. La variabile presenta un ampio intervallo in cui il valore delle emissioni di GHG oscilla, si passa da valori prossimi allo zero fino a 13.969 MtCO<sub>2e</sub> (emissioni cinesi del 2023), indice di estrema variabilità. Non bisogna però farsi ingannare dal valore minimo registrato di  $ghg$ , che non è poi così basso come si può pensare. Questo perché il dato è espresso in MtCO<sub>2e</sub>, ovvero oltre 42 milioni e mezzo di kg di gas climalteranti immessi dall'uomo nell'atmosfera, per niente pochi (valore registrato nel Nauru nel 2009). Il divario tra minimo e massimo e l'elevato scarto quadratico medio (oltre 1100) confermano un'eterogeneità marcata. Tale eterogeneità rispecchia le diverse strutture economiche, demografiche e industriali dei Paesi inclusi. Il dato suggerisce che, nel modello econometrico, potrebbe essere utile considerare trasformazioni (es. logaritmica) per attenuare l'impatto degli *outlier*. Relativamente alla curtosi, il valore eccezionalmente elevato (83,831) è tipico di distribuzioni leptocurtiche con code estreme (*outlier* significativi). Ciò significa che gran parte dei Paesi ha valori contenuti, ma alcuni Paesi mostrano picchi fuori scala.

## 2. Variabile *nuclear*:

La mediana nulla indica che almeno la metà dei Paesi del campione non produce elettricità da fonte nucleare (o ne produce in misura marginale). La media relativamente bassa (3,7%), ma con un massimo di quasi il 78% (dato francese nel 2011), è indice che pochi Paesi fanno largo uso del nucleare, mentre la maggior parte non lo impiegano affatto. Infatti, solo 27 Paesi su 171 analizzati, ossia meno del 16%, utilizzano il nucleare nel loro mix energetico, un dato allarmante. Questo perché, come già evidenziato, inserire il nucleare nel proprio mix energetico è l'unica soluzione più sicura, economica ed efficiente per la decarbonizzazione Statale prima e mondiale poi, e per mitigare l'inquinamento ormai dilagante. Lo scarto quadratico medio (11,204) conferma quanto detto sinora: differenze sostanziali tra i Paesi, generando una forte eterogeneità. Ulteriori conferme arrivano dall'analisi del coefficiente di variazione (3,028), indicando che la quota nucleare è molto concentrata in pochi Paesi, mentre la maggior parte registra valori bassi o nulli. Quanto ad asimmetria (3,56) e curtosi (13,294), confermano che la distribuzione è spostata verso valori bassi, con una coda a destra di Paesi che presentano i valori migliori, rendendo polarizzata la quota di nucleare usata.

## 3. Variabile *renewables*:

Riguardo l'intervallo di valori della percentuale di energia elettrica ricavata da fonti rinnovabili, si osservano Paesi con un mix totalmente rinnovabile, ma anche Paesi con percentuali nulle. A titolo d'esempio, l'Albania utilizza il 100% di fonti rinnovabili per il suo approvvigionamento elettrico, mentre la Libia utilizza esclusivamente fonti fossili, rendendo quindi la percentuale di rinnovabili e nucleare nulle. La media (35,4) è superiore alla mediana (24,967), ma in misura meno marcata rispetto a *ghg*, suggerendo ancora una certa asimmetria (0,673), sebbene non estrema. Alcuni Paesi ricchi di fonti rinnovabili mostrano livelli molto elevati, mentre altri, per ragioni geografiche o tecnologiche, si affidano quasi esclusivamente a combustibili fossili.

Il coefficiente di variazione poco minore dell'unità segnala una minore dispersione relativa rispetto alle variabili precedenti (anche se in assoluto resta un notevole *range*).

4. Variabile *fossil*:

La media di oltre il 60% indica che la maggior parte della produzione elettrica mondiale (considerando i Paesi e gli anni del campione) si basa su fonti fossili. Inoltre, la mediana superiore alla media ( $67,549 > 60,891$ ) conferma un'asimmetria inversa ( $-0,451$ ) rispetto a *renewables*; ciò rispecchia il fatto che molti Paesi hanno ancora quote significative di combustibili fossili nel proprio mix energetico contribuendo ad aumentare le emissioni inquinanti. I valori estremi raggiunti da alcuni Paesi (massimo del 100%) indicano la massima dipendenza dai fossili, mentre altri sono a 0, laddove la produzione provenga integralmente da rinnovabili e nucleare. Il coefficiente di variazione di 0,553 indica una dispersione relativa più bassa rispetto alle altre fonti, verosimilmente perché la quota di fossili si attesta maggiormente in un range frequente (40-80%) per molti Paesi.

5. Variabile *consum*:

Il divario tra media e mediana è molto ampio (la media è oltre 10 volte maggiore della mediana), suggerendo una distribuzione fortemente asimmetrica verso destra, confermata dal valore 8,427. La maggior parte dei Paesi registrano valori di consumi di energia primaria piuttosto bassi, mentre un ristretto gruppo raggiunge livelli estremamente alti, innalzando in modo marcato la media. Il minimo è quasi nullo, mentre il massimo supera i 47.000 TWh, evidenziando la presenza di Paesi con enormi consumi energetici (verosimilmente economie molto grandi e/o fortemente industrializzate, le prime tre posizioni sono rispettivamente di Cina, USA e India). Il range conferma la profonda eterogeneità nel fabbisogno energetico primario. Il valore dello scarto quadratico medio (3633,7) è coerente con la presenza di outlier di grande entità, rivelando un'ampia dispersione rispetto alla media, segno che i consumi energetici si distribuiscono in modo molto disomogeneo tra le diverse osservazioni.



La deviazione standard risulta maggiore di oltre quattro volte la media (cf. variaz. = 4,196). Ciò si spiega con il fatto che i consumi energetici in alcuni Paesi superano di molto quelli della maggioranza, “spostando” sensibilmente la distribuzione. Un valore di curtosi così alto (80,285, decisamente superiore a 3, tipico di una normale) segnala una distribuzione leptocurtica con la presenza di outlier estremi. In pratica, gran parte dei dati resta “compressa” su valori più contenuti, ma poche osservazioni si spingono molto in alto, generando code estremamente “pesanti”.

6. Variabile *gdp\_percapita*:

Il minimo (poco più di 500\$, valore registrato nella Repubblica Democratica del Congo nel 2009, Paese con più abitanti dell'Italia, oltre 64 milioni, indice di estrema povertà) e il massimo (oltre 180.000\$, dato registrato nel 2012 in Qatar) mostrano enormi divari tra Paesi a reddito molto basso e Paesi con PIL pro-capite estremamente elevato. La media (21.803\$) è ben superiore alla mediana (13.552\$), segnalando un'elevata concentrazione di Paesi nella parte bassa della distribuzione, con alcuni outlier ad alto reddito. Un PIL pro-capite più elevato può tradursi in maggiori consumi energetici (e potenzialmente più emissioni), ma al contempo favorire politiche e tecnologie “verdi”.

7. Variabile *pop*:

Il range di valori spazia da piccolissimi Stati a Paesi con oltre un miliardo di abitanti. Il valore minimo della popolazione è registrato nel Nauru nel 2009, mentre il massimo in India nel 2024. Quanto osservato risulta essere una prima conferma dell'ipotesi di correlazione positiva tra le emissioni e la popolazione ( $\text{corr}[\text{ghg}, \text{pop}] > 0$ ), ovvero maggiore è la popolazione e maggiori sono le emissioni; infatti, l'India è al terzo posto al mondo per emissioni di GHG. La media superiore alla mediana di oltre 4 volte indica che un numero relativamente ridotto di Paesi altamente popolosi “alza” drasticamente la media.

Ulteriore conferma della positività della correlazione tra *ghg* e *pop* deriva dal fatto che la popolazione influisce direttamente sulla domanda complessiva di energia: maggiore è la popolazione di uno Stato, maggiore sarà la richiesta di energia dei cittadini, andando ad enfatizzare un altro indicatore, il fattore di efficienza, ossia le emissioni di GHG pro-capite (ottenute dal rapporto di *ghg* e *pop* per ogni Stato ogni anno, espresse in tCO<sub>2</sub>e), non considerate direttamente nell'analisi, ma che potranno essere esaminate qualora significative. Il valore elevato del coefficiente di variazione (3,62) indica che la deviazione standard è circa 4 volte la media, segnalando un'elevata variabilità interna ai Paesi. L'alto valore dell'asimmetria (7,88) conferma che pochi Paesi popolosi trainano la coda destra della distribuzione, in questo caso leptocurtica, presentando outlier significativi (curtosi pari a 65,519). Ciò dimostra che alcuni Stati presentano picchi fuori scala che andranno normalizzati.

A questo punto si presenta un'analisi della correlazione tra le variabili studiate.

Tabella.5 – Matrice di correlazione tra le variabili studiate.

	ghg	nuclear	renewables	fossil	consum	gdp_percapita	pop
ghg	1	0,079	-0,0647	0,0366	0,976	0,0502	0,839
nuclear	0,079	1	-0,0827	-0,253	0,129	0,229	0,0284
renewables	-0,0647	-0,0827	1	-0,943	-0,0829	-0,0975	-0,0533
fossil	0,0366	-0,253	-0,943	1	0,0378	0,0185	0,0424
consum	0,976	0,129	-0,0829	0,0378	1	0,112	0,762
gdp_percapita	0,0502	0,229	-0,0975	0,0185	0,112	1	-0,0548
pop	0,839	0,0284	-0,0533	0,0424	0,762	-0,0548	1

Per una visualizzazione più immediata della correlazione tra le variabili, presentata nella Tabella.5, si propone la Figura.8, una mappa di calore che rappresenta graficamente l'intensità delle correlazioni, rendendone la distribuzione più intuitiva e facilmente interpretabile.

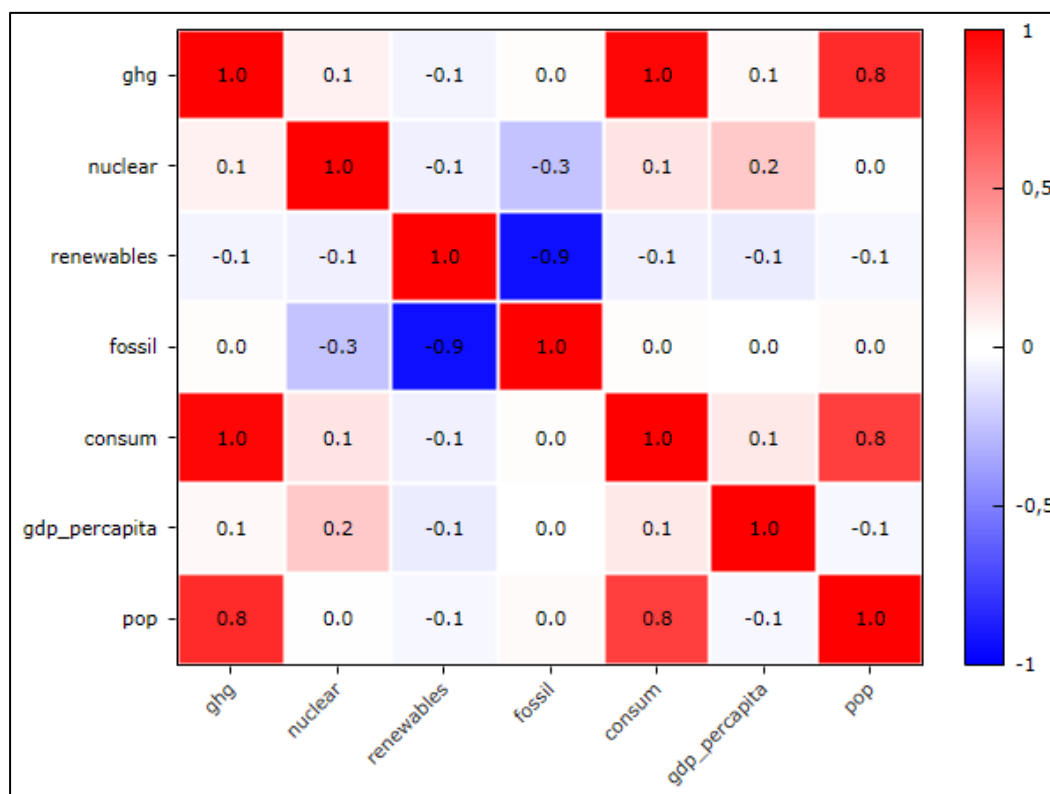


Figura.8 – Mappa di calore della matrice di correlazione Tabella.5. I valori sono approssimati.

Prima di analizzare i valori riportati nella Tabella.5, è opportuno fare alcune precisazioni. La parte evidenziata “in alto a destra” della tabella è stata selezionata intenzionalmente, poiché i valori nella sezione non evidenziata sono identici, in quanto la matrice di correlazione è simmetrica rispetto alla diagonale principale. Quest’ultima è costituita esclusivamente da valori pari a 1, poiché la correlazione di una variabile con sé stessa è sempre pari a 1 per definizione. Inoltre, le variabili dummy sono state volutamente escluse dall’analisi (per le precedenti motivazioni). Dunque, ora si propone con l’analisi approfondita della correlazione tra le variabili (ossia una misura della forza e della direzione del legame lineare tra coppie di variabili) con l’obiettivo di mettere in luce i principali legami tra esse.

1. La correlazione tra le emissioni di GHG e la popolazione (0,839) indica un’elevata correlazione positiva, in linea con l’idea emersa durante lo studio delle statistiche descrittive. In altre parole, all’aumentare della popolazione, le emissioni di gas serra tendono a crescere in modo lineare. Questo risulta coerente con l’idea che Paesi molto popolosi, specie se industrializzati o in via sviluppo, producano volumi maggiori di GHG.

Curiosa è la correlazione molto bassa tra *ghg* e *fossil* (0,0366) che potrebbe sembrare controintuitiva. Tuttavia, si deve considerare che l'intensità delle emissioni non dipende solo dalla percentuale di combustibili fossili, ma anche da fattori quali efficienza, tecnologie, politiche ambientali, reddito, ecc. Inoltre, questo non esclude relazioni non lineari, trattate successivamente.

2. Una correlazione positiva, sebbene non molto elevata, tra *nuclear* e *gdp\_percapita* (0,229), indica che, tendenzialmente, Paesi con un PIL pro-capite più alto potrebbero avere maggiore disponibilità tecnologica e finanziaria per investire nel nucleare.

Laddove la quota nucleare aumenta, la dipendenza dai combustibili fossili tende a ridursi ( $\text{corr}[\text{nuclear}, \text{fossil}] = -0,253 < 0$ ). Non è un rapporto perfetto, ma si nota una certa sostituzione: Paesi che puntano su centrali nucleari spesso riducono la quota di fossili nel proprio mix, pur essendoci numerose eccezioni. Il legame negativo, seppur debole, fra impiego del nucleare e rinnovabili, suggerisce che una parte dei Paesi che utilizzano nucleare non sempre investe pesantemente nelle rinnovabili (o viceversa). La presenza di uno non esclude necessariamente l'altro, ma tende a ridimensionarlo in parte.

3. La correlazione tra *renewables* e *fossil* pari a -0,943 indica una fortissima relazione inversa. Laddove la quota di rinnovabili è alta, quella dei combustibili fossili risulta bassa e viceversa. Ciò è coerente con l'idea che *nuclear*, *renewables* e *fossil* rappresentino segmenti in concorrenza per arrivare al 100% del mix energetico. In particolare, i Paesi con mix quasi esclusivamente rinnovabile si contrappongono a quelli in cui dominano le fonti fossili. La correlazione moderatamente negativa tra *renewables* e *gdp\_percapita* (-0,0975) potrebbe indicare che un reddito pro-capite elevato non si traduce necessariamente in una quota altrettanto elevata di rinnovabili. Molti Paesi ricchi utilizzano ancora combustibili fossili o nucleare su larga scala, mentre alcune nazioni con PIL più modesti, ma con risorse naturali rilevanti (ad es. abbondanza di idroelettrico in Albania), possono avere quote rinnovabili molto alte.

4. La correlazione tra *consum* e *ghg* è prossima all'unità, suggerendo una quasi perfetta relazione lineare tra i consumi primari di energia e le emissioni totali di GHG. In altre parole, all'aumentare di *consum*, *ghg* tende a crescere in modo quasi direttamente proporzionale. L'implicazione maggiore riguarda la domanda totale di energia primaria, spesso ancora soddisfatta da fonti fossili, causa delle maggiori emissioni. Un altro valore significativo interessa il legame positivo e marcato tra *pop* e *consum* (0,762): all'aumentare della popolazione, crescono i consumi di energia. Questo risulta intuitivo, poiché Paesi con più abitanti tendono ad avere fabbisogni energetici complessivi più elevati (domestici, industriali e nei trasporti). Ciò si traduce in un effetto demografico ovvio: una popolazione numerosa richiede più energia, a prescindere dal mix energetico (nucleare, rinnovabili e fossili), incrementando le emissioni inquinanti.
5. Come detto in precedenza, qualora significativo, si sarebbe considerato il fattore di efficienza, ossia le emissioni di GHG pro-capite. In questo caso è interessante far luce sulla correlazione tra esse e il PIL pro-capite, pari a 0,554 (unico valore significativo ai fini dell'analisi e quindi considerato).

Il coefficiente di correlazione lineare indica una relazione positiva di entità moderata fra due variabili. In altre parole, vi è la tendenza, seppure non perfettamente lineare, affinché Paesi con un PIL pro-capite più elevato presentino anche maggiori emissioni di GHG pro-capite. Questo risulta coerente con l'ipotesi che gli standard di vita più elevati (oltre che il consumo di beni e servizi più energivori) possano innalzare i livelli di inquinamento, in assenza di politiche di mitigazione o tecnologie più "verdi". Il legame positivo è indice di un benessere economico che tende a far crescere l'impatto emissivo individuale, ma con numerose eccezioni dovute a differenze nell'efficienza, nelle politiche ambientali e nelle disponibilità tecnologiche. Da un punto di vista macro-ambientale, ciò segnala la necessità di orientare la crescita economica verso modelli sostenibili, in cui l'innovazione riduca la dipendenza dai combustibili fossili e promuova un uso razionale delle risorse energetiche.

Come analizzato per le emissioni pro-capite, una breve digressione doverosa sui consumi pro-capite (ottenuti dal rapporto tra *consum* e *pop*, espressi in kWh). I valori interessanti riguardano la correlazione con le altre variabili pro-capite:  $\text{corr} [\text{consum\_percapita} , \text{gdp\_percapita}] = 0,751$  e  $\text{corr} [\text{consum\_percapita} , \text{ghg\_percapita}] = 0,795$ . Nel primo caso si osserva che Paesi con livelli di reddito individuale più elevati tendono ad avere anche consumi di energia più alti per abitante: un aumento del benessere economico pro-capite, determina un aumento dei consumi energetici individuali. Questo *trend* è spesso attenuato nei Paesi che attuano politiche di efficienza energetica, ma i dati suggeriscono comunque un legame positivo tra reddito e consumi. Nel secondo caso, la correlazione piuttosto forte è indicativa di un legame marcato fra l'energia media utilizzata da ciascun individuo e l'impatto emissivo pro-capite. Se la quota di fonti fossili resta significativa, l'aumento del consumo energetico per persona si traduce in maggiori emissioni per persona. Ciò rivela l'importanza cruciale di migliorare il mix energetico e l'efficienza tecnologica, per ridurre le emissioni senza penalizzare il fabbisogno energetico e lo sviluppo.

L'insieme dei dati raccolti mostra una forte eterogeneità tra i Paesi, sia in termini di strutture economiche, sia di disponibilità e scelte energetiche. Ciò rende particolarmente significativa un'analisi che includa non solo correlazioni lineari, ma anche possibili interazioni e specificità nazionali (variabili dummy). Si è visto che la maggior parte dei Paesi analizzati (oltre il 60%) utilizza combustibili fossili per la produzione interna di energia elettrica. Alcuni Paesi raggiungono il 100%, sottolineando la forte dipendenza da carbone, petrolio e gas. Tali Paesi spesso soffrono di problemi di sicurezza energetica, specie laddove l'*import* di combustibili fossili grava sulla bilancia commerciale. A livello ambientale, l'uso intensivo di fossili costituisce un ostacolo alla riduzione globale delle emissioni. Inoltre, la distribuzione presenta un'alta polarizzazione: alcuni Paesi puntano in modo significativo sul nucleare, raggiungendo quote vicino al 70-78%. La maggior parte, invece, non ne fa uso (mediana = 0).

Infatti, il massimo di *renewables* e *fossil* è il 100%, sintomo che vi sono Paesi che utilizzano solo fonti rinnovabili o solo fonti fossili per il loro approvvigionamento elettrico, mentre Stati che usano solo il nucleare non esistono. Pur essendo considerato pulito dal punto di vista ambientale, il nucleare non è adottato uniformemente, a causa di fattori sociopolitici (accettazione pubblica, normativa, sicurezza) e di disponibilità economica/tecnologica (come confermato dalla correlazione moderata tra *nuclear* e *gdp\_percapita*). La crescita del PIL pro-capite resta un obiettivo di molte economie emergenti; tuttavia, i dati indicano che un semplice incremento del reddito, se non accompagnato da un'evoluzione tecnologica e istituzionale, può aggravare le emissioni per abitante. Le correlazioni confermano un meccanismo per cui chi dispone di un reddito più elevato e consuma più energia, in assenza di soluzioni pulite o di efficienza avanzata, rischia di aumentare parallelamente le proprie emissioni pro-capite. Pertanto, per decarbonizzare, occorre intervenire non solo sulla domanda energetica (attraverso l'efficienza, l'innovazione tecnologica e la sensibilizzazione dei consumatori) ma anche sull'offerta (puntando su fonti rinnovabili e soprattutto sul nucleare). Vero è che una correlazione pro-capite elevata non implica necessariamente che l'energia aggiuntiva sia prodotta in modo inefficiente o solo da combustibili fossili. Resta il fatto che aumentare l'efficienza energetica e favorire tecnologie *low-carbon* diventa cruciale nei Paesi più popolosi, poiché la crescita demografica non accompagnata da politiche ambientali rischia di tradursi in un incremento rilevante delle emissioni globali. Alcune correlazioni appaiono deboli o “controintuitive”, ma ciò non esclude che possano emergere relazioni significative in forma logaritmica, quadratica o interattiva. Le variabili *d\_bitcoin* e *d\_policy* possono cogliere cambiamenti strutturali non catturabili dalle variabili continue. Il loro impatto va valutato in sede di regressione, soprattutto laddove i dati mostrino asimmetrie elevate o outlier.

La presenza di outlier, l'elevata asimmetria di alcune variabili e l'elevata correlazione suggeriscono di impiegare:

- trasformazioni logaritmiche o altri metodi per stabilizzare la varianza;
- test di robustezza (es. modelli *panel* con effetti fissi/casuali) per controllare la sensibilità delle stime;

- analisi di interazioni volte a individuare effetti congiunti tra popolazione, reddito, consumi e mix energetico.

Paesi a reddito elevato possono investire in tecnologie costose (centrali nucleari di ultima generazione, sistemi di accumulo per le rinnovabili, reti *smart*), riducendo progressivamente l'uso dei fossili; mentre Paesi a basso reddito necessitano di supporto internazionale (finanziamenti agevolati, trasferimenti tecnologici) per passare a un sistema energetico più pulito. Nel complesso, l'analisi evidenzia l'urgenza di interventi integrati e flessibili che tengano conto di fattori molteplici (demografia, reddito, politiche, tecnologie), al fine di governare efficacemente la transizione verso un paradigma energetico meno impattante a livello climatico.



## 2.3 L'evolversi delle variabili

In questo sotto-capitolo si esamina l'andamento temporale delle variabili considerate, nel periodo 2009-2024. L'analisi si basa sui valori medi annuali, interpretati come una serie storica in cui l'unità statistica corrisponde all'insieme mondiale.

### 1. Variabile *ghg*:

Le emissioni di gas serra sono aumentate del 13,54% (nel 2024 si registrano 35,91 MtCO<sub>2</sub>e in più rispetto al 2009), segnalando una crescita nell'impatto ambientale delle attività economiche. Questo trend può essere legato sia a una maggiore domanda energetica globale che a una dipendenza persistente dalle fonti fossili, nonostante gli sforzi per la transizione ecologica messi in atto dagli Stati che nel tempo hanno adottato politiche ambientali valide o aderito ad accordi internazionali.

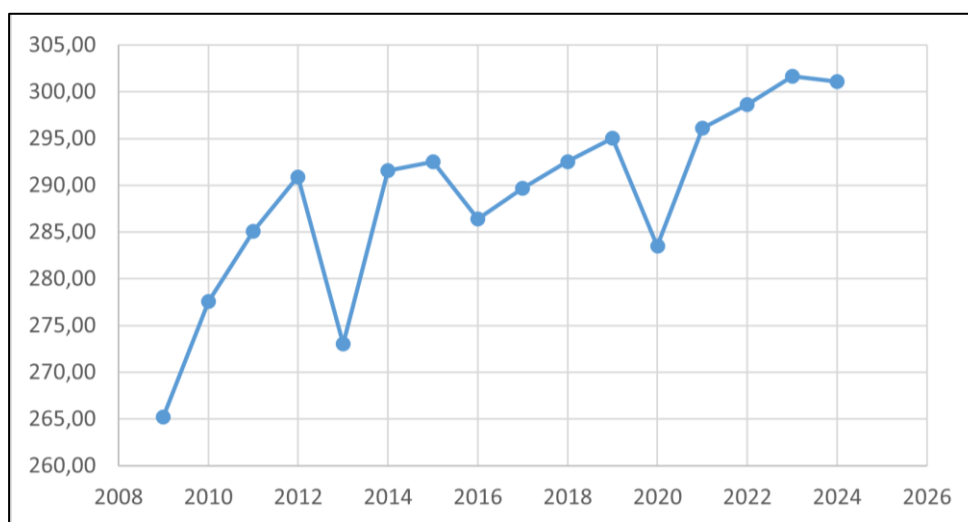


Grafico.1 – Variazione di *ghg* nel tempo. Rielaborazione interna.

Dal Grafico.1 si osserva una crescita delle emissioni di GHG nel tempo, ma è agile notare anche due picchi a ribasso in corrispondenza del 2013 e del 2020.

Il primo ribasso è dovuto al rallentamento economico globale iniziato nel 2012, soprattutto in Europa a causa della crisi del debito sovrano<sup>67</sup>, con il rallentamento generalizzato dei settori industriali e produttivi che hanno determinato una riduzione della domanda di energia e di conseguenza una diminuzione delle emissioni. Inoltre, a livello globale, nel 2013 si è osservato un calo della produzione di energia da carbone grazie all'adozione di politiche climatiche e ambientali più restrittive in alcuni Paesi (es. Cina e USA) e all'incentivo per le fonti rinnovabili. Il secondo ribasso è dovuto alla pandemia di Covid-19 che ha impattato (solo in questo caso) positivamente sull'inquinamento a causa delle restrizioni globali imposte dai vari Stati. Quell'anno si sono osservate la riduzione delle attività industriali, la limitazione dei trasporti e la minore produzione di energia, fattori che, sommati, hanno portato al calo presentato. Il rialzo del 2021 ai livelli pre-pandemia è coerente con la ripresa economica e la riapertura delle attività, suggerendo che il calo del 2020 è stato temporaneo e non legato a una transizione strutturale verso fonti energetiche più pulite.

2. Mix energetico (variabili *nuclear*, *renewables* e *fossil*):

Dal 2009 al 2024, la quota di elettricità ricavata dall'energia nucleare è diminuita del 13,53%, la quota ricavata da fonti rinnovabili è cresciuta del 20,26%, mentre la quota di fonti fossili è diminuita del 9,58%. Per quanto riguarda il nucleare, il dato potrebbe essere dovuto a politiche di disinvestimento dal nucleare in alcuni Paesi (es. Germania), a ritardi nello sviluppo di nuove centrali e alla crescita di altre fonti energetiche. Questo dato sembra contrastare l'idea secondo la quale il nucleare è la chiave per una decarbonizzazione rapida, sicura, pulita ed economica, il che suggerisce una potenziale area di studio su come le politiche energetiche abbiano influenzato questa tendenza; infatti, tale riduzione del nucleare potrebbe rallentare gli obiettivi di decarbonizzazione.

---

<sup>67</sup> Per un approfondimento sul tema si può consultare la pagina web ufficiale della CONSOB: <https://www.consob.it/web/investor-education/crisi-debito-sovrano-2010-2011>.

Per quanto concerne le rinnovabili, l'aumento può essere attribuito a investimenti massicci in energia solare, eolica e idroelettrica, insieme a incentivi e politiche globali di riduzione della CO<sub>2</sub> emessa. Tuttavia, la crescita delle rinnovabili non è stata sufficiente a compensare l'aumento complessivo delle emissioni, indicando possibili inefficienze o limiti delle attuali tecnologie rinnovabili. Infine, un dato che fa piacere commentare è la riduzione dell'utilizzo delle fonti fossili nei mix energetici globali, anche se si nota una discesa del loro impiego relativamente lenta. Questo suggerisce che, sebbene vi sia stata una certa riduzione dell'utilizzo di carbone, petrolio e gas naturale, le energie fossili continuano a essere una componente dominante del mix energetico mondiale. La transizione verso alternative più pulite potrebbe essere rallentata da infrastrutture consolidate, costi iniziali elevati, resistenze politiche e dalla presenza di norme ormai antiquate che rendono questo tipo di energia estremamente competitiva sul mercato.

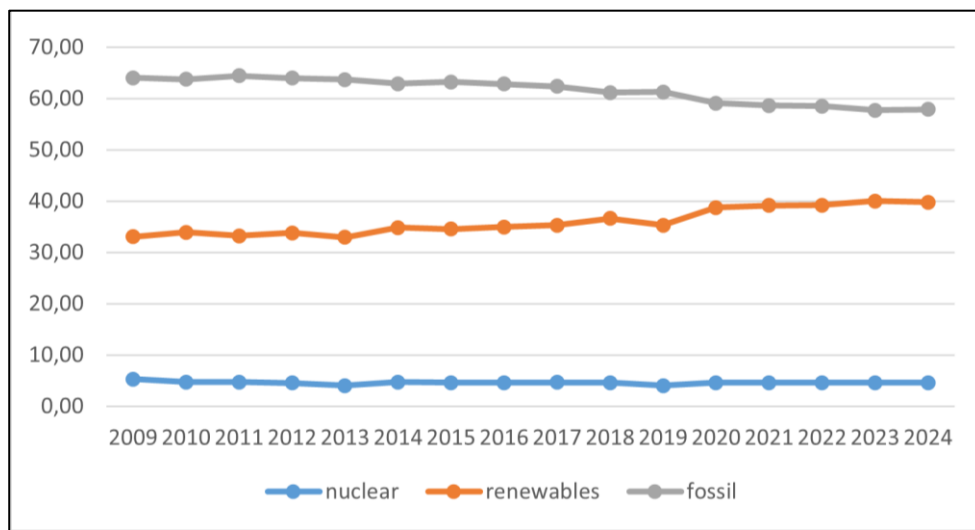


Grafico.2 – Variazione di *nuclear*, *renewables* e *fossil* nel tempo. Rielaborazione interna.

Dal Grafico.2 è semplice notare come nel 2019 ci sia un aumento dell'utilizzo di fonti rinnovabili (variazione assoluta di 6,7%) e conseguentemente una discesa delle fonti fossili (variazione assoluta di -6,13%). Questo risulta essere in linea con l'aumento di efficienza energetica in diversi settori, incentivi governativi sulle rinnovabili e riduzione dei costi di energia solare ed eolica, ma anche grazie alla continua adesione a politiche ambientali da parte degli Stati.

Il nucleare sembra essere stabile con un leggero trend ribassista (variazione assoluta di -0,72%). Questo andamento riflette il mancato ampliamento della capacità nucleare globale e la chiusura di alcuni impianti storici in alcuni Paesi (come Germania e Giappone). Tuttavia, negli ultimi anni, si osserva una maggiore discussione sulla reintroduzione del nucleare come energia pulita a basse emissioni di CO<sub>2</sub>, il che potrebbe invertire questa tendenza nel medio-lungo termine. Si rammenta che il modo più veloce, sicuro, pulito ed economico di decarbonizzare il mondo rimane l'energia nucleare, come evidenziato da numerosi paper scientifici analizzati nel capitolo 1 e come confermano organizzazioni<sup>68</sup> di calibro mondiale quali WEF, ONU, IAEA, ITER, IPCC, UNEP, UNSCEAR, IEA e molte altre. Il problema maggiore del continuo reperimento di energia da fonti non pulite è il cambiamento climatico, che purtroppo negli ultimi anni si è potuto toccare con mano<sup>69</sup>, come afferma il fisico L. Romano (conosciuto come L'avvocato dell'atomo) “per combattere il cambiamento climatico non servono più reattori sicuri, ma più reattori, perché il reattore più pericoloso è quello che non viene costruito”.

### 3. Variabile *consum*:

I consumi di energia primaria sono aumentati del 28,68% (213,62 TWh in più nell'arco dei 16 anni analizzati), un aumento significativo che segna una crescente domanda energetica dovuta a fattori come l'aumento della popolazione, l'industrializzazione nei Paesi emergenti e l'espansione delle economie digitali. Tale incremento rende ancora più urgente la necessità di passare a fonti di energia pulite per evitare un'ulteriore complicazione sul piano ambientale, rendendo più complessa la riduzione delle emissioni di gas inquinanti e sottolineando come sia sempre più necessario un cambiamento strutturale nella produzione e nel consumo di energia.

---

<sup>68</sup> Per un approfondimento si consulti la sitografia.

<sup>69</sup> Per un approfondimento sul tema si può consultare la pagina ufficiale ONU <https://unric.org/it/che-cosa-sono-i-cambiamenti-climatici/>. Inoltre, vi sono numerosi studi scientifici a riguardo colmi di dati analizzati: <https://ourworldindata.org/how-much-co2-can-the-world-emit-while-keeping-warming-below-15c-and-2c>, <https://ourworldindata.org/temperature-anomaly>, <https://ourworldindata.org/climate-change-support> e <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>.

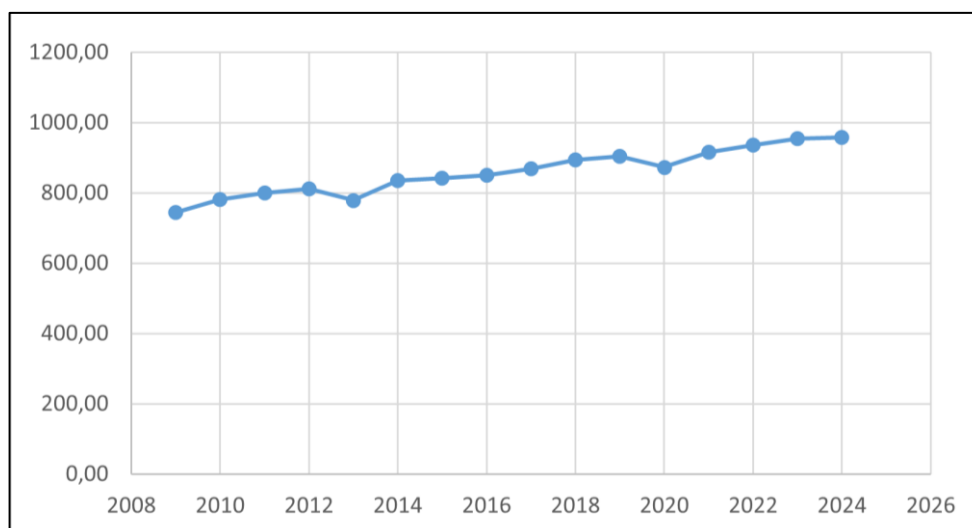


Grafico.3 – Variazione di *consum* nel tempo. Rielaborazione interna.

Nel Grafico.3, in corrispondenza del 2013 e del 2020, si nota una leggera convergenza ribassista, esattamente come per la variabile *ghg*, anche se in questo caso meno accentuato. Il trend rimane rialzista.

#### 4. Variabile *gdp\_percapita*:

Il PIL pro-capite è aumentato del 61,31% nel periodo considerato, una significativa crescita economica che suggerisce un forte sviluppo globale. Questo potrebbe essere legato all'aumento della produzione industriale e all'innovazione tecnologica, che hanno aumentato la domanda energetica. Tuttavia, l'aumento della produzione industriale e del consumo di beni e servizi ha contribuito all'aumento delle emissioni, rendendo di fatto la crescita economica non ancora “decarbonizzata”. Nel Grafico.4 (pagina seguente) non vi sono variazioni importanti nell'anno del Covid-19, ma subito dopo, con un'impennata rialzista che ha portato ad un aumento del 32,8% nel 2023 rispetto ai livelli pre-pandemici, per poi calare del 6,23% nel 2024. Questi *shock* sono in parte attribuiti alla ripresa della produzione, al ritorno della domanda globale e agli stimoli economici adottati dai governi negli anni post-pandemici, mentre il rallentamento economico del 2024 potrebbe essere dovuto a diversi fattori, come l'inflazione persistente, le tensioni geopolitiche o una crisi nel settore energetico che ha rallentato la crescita economica globale.

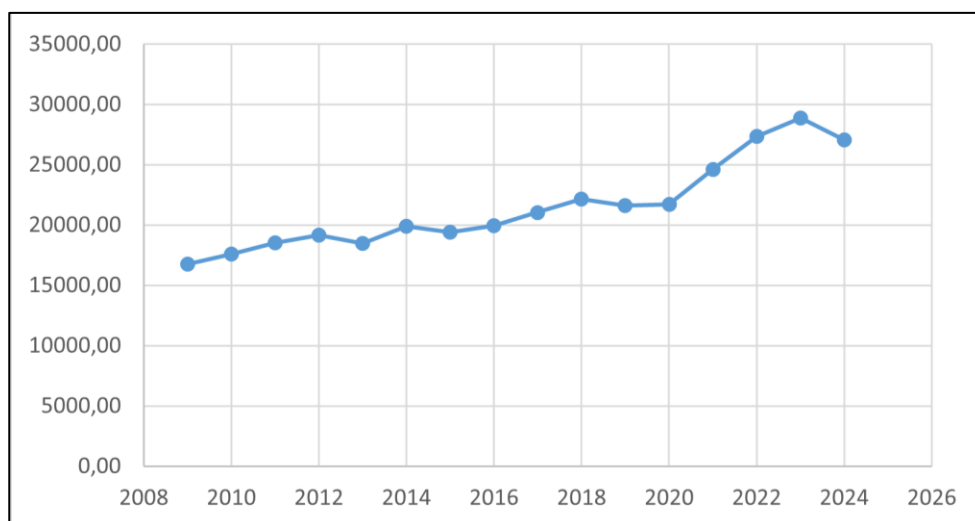


Grafico.4 – Variazione di *gdp\_percapita* nel tempo. Rielaborazione interna.

5. Riguardo le variabili rimanenti (*pop*, *d\_bitcoin* e *d\_policy*), si può affermare che la popolazione mondiale è in aumento: prolungando la serie storica<sup>70</sup> fino agli inizi del 1900, si nota come la popolazione mondiale fosse di 1,65 miliardi di persone, mentre oggi il dato si attesta sugli oltre 8 miliardi, circa 5 volte maggiore rispetto a 125 anni fa. Questo dato è allarmante, evidenzia una crisi demografica in atto, ovvero una continua sovrappopolazione, perché è chiaro che non vi è posto e lavoro per tutti<sup>71</sup>. Si pensi che nel 1750 la popolazione era di 791 milioni di persone e che in 150 anni è aumentata del 52%, mentre negli ultimi 125 anni l'aumento è del 400%. Riguardo al tasso di adozione di Bitcoin nei Paesi considerati, tra il 2009 e il 2024, esso è aumentato del 95%, passando da 4 Stati nel 2009 dove Bitcoin era utilizzato o conosciuto e nei quali si iniziava a sperimentare il mining, ad oggi che si contano 76 nazioni dove Bitcoin viene ampiamente utilizzato e dove il mining è ormai una realtà consolidata (il 44% degli Stati).

<sup>70</sup> Dati Wikipedia disponibili a [https://it.wikipedia.org/wiki/Popolazione\\_mondiale](https://it.wikipedia.org/wiki/Popolazione_mondiale).

<sup>71</sup> In argomento si possono consultare i seguenti studi scientifici colmi di dati interessanti: <https://ourworldindata.org/population-growth-over-time>, <https://ourworldindata.org/global-population-pyramid> e <https://ourworldindata.org/demographic-transition>.

Con riferimento alle politiche ambientali, l'aumento di Stati ove esse sono in vigore è del 100%, poiché nel 2009 non vi era alcun Paese che avesse discusso un'entrata in vigore di una politica per salvaguardare l'ambiente o il clima, mentre oggi sono un “*must have*” nei Paesi sviluppati; infatti, in 61 Stati dei 171 analizzati si conta almeno una legge a favore dell'ambiente, nonostante il dato sia ancora basso (circa il 36% del totale) è pur sempre un inizio.

6. Anche se non esplicitamente considerate nell'analisi, è utile una breve digressione sulle emissioni e sui consumi pro-capite. Infatti, osservando il Grafico.5, si può dire che vi è una tendenza strutturale alla riduzione delle emissioni pro-capite, con alcune fasi di oscillazione legate a shock economici e transizioni energetiche (come nel 2013 e nel 2020).

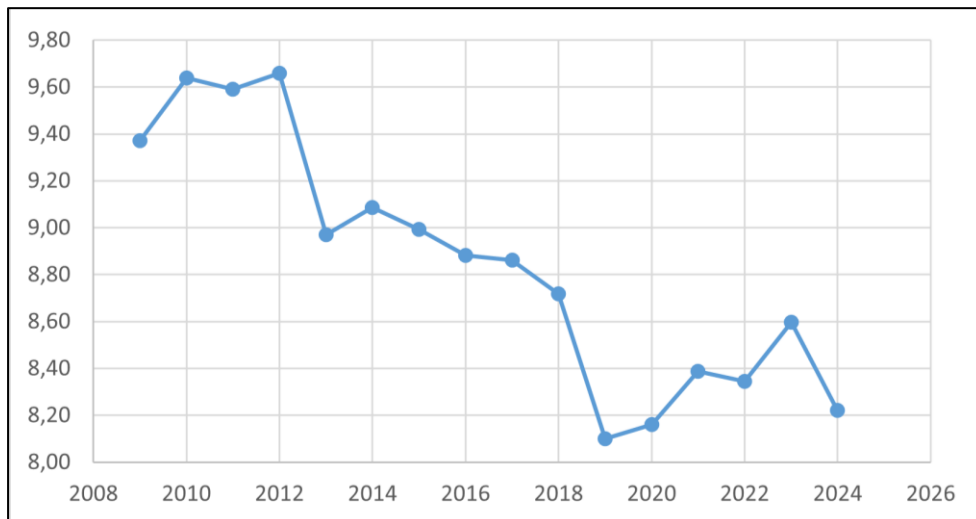


Grafico.5 – Variazione delle emissioni pro-capite nel tempo. Rielaborazione interna.

Tuttavia, il recente rimbalzo, coincidente con la fine della pandemia, suggerisce che, nonostante i progressi nella decarbonizzazione, la crescita economica e il fabbisogno energetico potrebbero ancora rappresentare una sfida nella riduzione sostenibile delle emissioni individuali. Sarà quindi essenziale continuare a investire in tecnologie pulite, efficienza energetica e politiche ambientali mirate per consolidare questo trend positivo nel lungo periodo.

Curioso è l'andamento non coincidente con il Grafico.1, questo perché le emissioni pro-capite sono ottenute direttamente dalla variabile  $ghg$ <sup>72</sup>. Questa discordanza può essere dovuta al fatto che a crescere più velocemente è il denominatore, ossia la popolazione. A confermare questa ipotesi è la correlazione positiva ed accentuata tra  $ghg$  e  $pop$  (0,839), mentre la correlazione tra le emissioni pro-capite e quelle totali è pressoché nulla. Pertanto, con l'avanzare del tempo, all'aumentare di  $ghg$ ,  $pop$  aumenta più velocemente, facendo risultare il loro rapporto decrescente. Dall'analisi del Grafico.6 si nota come i consumi pro-capite nel 2024 siano praticamente gli stessi del 2009, indicando come nei 16 anni esaminati, al netto di evidenti shock, la situazione non sia cambiata.

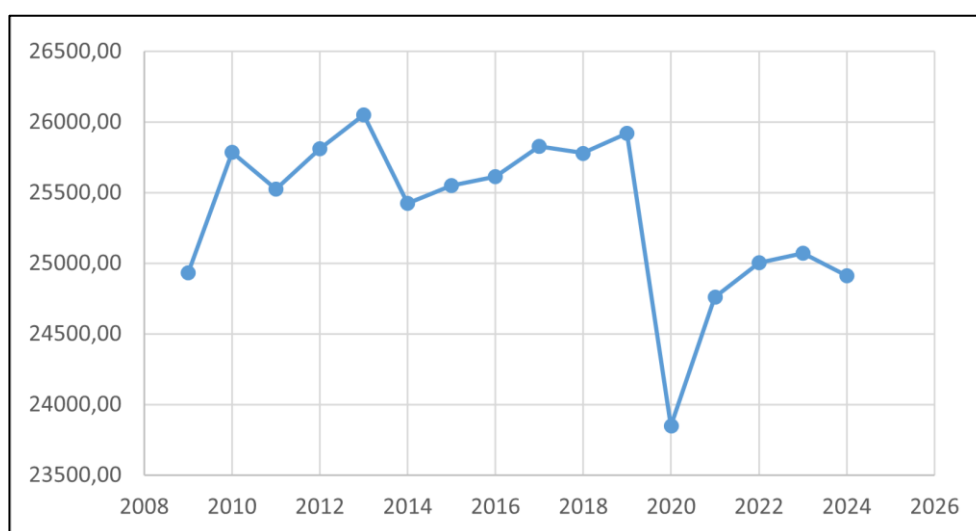


Grafico.6 – Variazione dei consumi pro-capite nel tempo. Rielaborazione interna.

Evidente è la brusca discesa del 2020, seguita da una ripresa parziale che però non ha riportato i consumi pro-capite ai livelli precrisi. Questo potrebbe suggerire che la pandemia abbia innescato un cambiamento strutturale nelle dinamiche di consumo energetico, con un'attenzione maggiore all'efficienza e alla transizione verso modelli di produzione e consumo più sostenibili.

Dal 2009 al 2024, il mondo ha attraversato crisi finanziarie, rivoluzioni tecnologiche, pandemie e conflitti geopolitici, con impatti significativi sui mercati e sulle politiche economiche.

<sup>72</sup> Si ricorda che le emissioni pro-capite sono ottenute come rapporto tra le emissioni totali di uno Stato e la sua popolazione, misurate in tCO<sub>2</sub>e.



Il periodo è stato caratterizzato da politiche monetarie espansive, crescita del digitale (Bitcoin, IA) e tensioni geopolitiche, elementi che continueranno a influenzare il futuro dell'economia globale. Le osservazioni e conclusioni tratte in questo capitolo sono utili per introdurre in modo efficace l'analisi che sarà affrontata nel capitolo successivo, nel quale si affronteranno i temi più tecnici di questo lavoro.

### 3. Modello econometrico

---

Nella fase successiva di questa ricerca, verrà sviluppato un modello econometrico che metterà in relazione le variabili principali con gli obiettivi di:

- stimare l'impatto delle diverse fonti energetiche e dei consumi complessivi di energia sulle emissioni di GHG;
- verificare se e come il PIL pro-capite, la popolazione e la quota nucleare/rinnovabile influiscano sull'inquinamento e sui consumi energetici;
- tenere conto degli effetti di outlier e asimmetrie, attraverso eventuali trasformazioni logaritmiche o metodologie panel;
- valutare il ruolo delle variabili dummy e la potenziale presenza di relazioni non lineari (interazioni tra variabili).

L'obiettivo finale è fornire un quadro empirico che aiuti a comprendere meglio i fattori determinanti delle emissioni di GHG, chiarendo se e in che misura il nucleare e Bitcoin possano effettivamente contribuire a una strategia di decarbonizzazione, anche in funzione della crescita economica e demografica dei singoli Paesi.

#### 3.1 Modelli di regressione

---

Di seguito verranno presentati i modelli di regressione ritenuti più significativi per l'analisi condotta. In particolare, l'obiettivo è quello di descrivere la relazione tra la variabile dipendente *ghg* e le variabili indipendenti selezionate, stimando i livelli di emissioni di gas serra a partire dai valori osservati delle altre variabili. Questo approccio consente di identificare i principali fattori che influenzano le emissioni e di valutare possibili strategie di mitigazione. L'analisi seguirà un percorso progressivo: inizialmente verranno applicati modelli di regressione lineare semplice, per poi estendere l'analisi a modelli di regressione lineare multipla. Successivamente, verranno considerati modelli non lineari, utili per correggere eventuali distorsioni dovute alla presenza di outlier.

Infine, si esamineranno le interazioni tra variabili, fondamentali per comprendere in che modo le emissioni dipendano da più fattori simultaneamente e come tali fattori interagiscano tra loro.

#### a) Regressione lineare semplice: *ghg* – *nuclear*.

Si presentano i dati relativi al modello *Pooled OLS* con le 2736 osservazioni, di cui 171 unità *cross section* per ogni anno ed una lunghezza delle serie storiche pari a 16 anni, dove la variabile dipendente è *ghg* e la variabile indipendente *nuclear*.

Tabella.6 – Regressione lineare semplice con *nuclear*.

	Coefficienti $\beta_0$ e $\beta_1$	Errore std.	Rapporto t	p-value
<b>const</b>	261,428	79,609	3,284	0,0012 ***
<b>nuclear</b>	7,846	5,328	1,473	0,143
<b>RSS</b>			3.390.000.000	
<b>SER</b>			1109,006	
<b>R<sup>2</sup></b>			0,00625	

Con riferimento ai dati della Tabella.6, dopo aver controllato la validità delle quattro assunzioni chiave econometriche (con il metodo degli errori standard robusti Arellano) al fine di garantire l'inferenza casuale con il metodo dei minimi quadrati ordinari e verificato l'assenza di collinearità tra le variabili, si può osservare quanto segue:

1. L'intercetta ( $\beta_0 = 261,428$ ) risulta statisticamente significativa (almeno del 99%): si può inferire che, in assenza di quota nucleare, le emissioni di GHG siano mediamente pari a circa 261 MtCO<sub>2</sub>e (su scala annua, per Paese), decisamente alte. Inoltre, il valore si avvicina molto alla media di *ghg* (circa 290 MtCO<sub>2</sub>e), indice del fatto che l'effetto marginale della quota nucleare risulta trascurabile in questo modello di regressione.

In altre parole, la relazione osservata in media tra *ghg* e *nuclear* non si discosta in modo significativo da una situazione in cui le emissioni di GHG si attestano attorno al valore costante dell'intercetta, indipendentemente dalle variazioni di *nuclear*.

2. Il p-value di *nuclear* (0,143) non consente di rifiutare l'ipotesi nulla a un livello di significatività convenzionale (10%). In altri termini, non è possibile concludere che la quota nucleare sia associata a una variazione significativa delle emissioni di gas clima alteranti in questo modello. Il coefficiente  $\beta_1$  (7,846) suggerirebbe un aumento di circa 7,85 MtCO<sub>2</sub>e per ogni punto percentuale in più di quota nucleare, ma l'ampio errore standard e il p-value insufficiente indicano che l'effetto non è robustamente stimato. Tale osservazione rafforza l'idea che *nuclear*, da sola, non spieghi in modo apprezzabile le differenze nelle emissioni totali di GHG.
3. Dal valore estremamente alto dell'RSS si evince che la varianza residua rimane molto elevata, segnalando una spiegazione parziale dei dati da parte del modello. Il SER (1109,006) indica quanto si discostano mediamente i valori osservati di *ghg* da quelli previsti dal modello. Un SER così alto, rispetto alla media di *ghg*, testimonia una notevole variabilità non catturata dalla regressione. Quanto all'R<sup>2</sup>, esso equivale a meno dell'1% di varianza spiegata.

Quanto appena analizzato trova una rappresentazione grafica (Grafico.7), utile a visualizzare a cui si fa riferimento, dove l'equazione della retta di regressione è:

$$ghg = 261,428 + 7,846 \text{ nuclear}$$

Grazie all'analisi grafica si può cogliere meglio il valore basso di R<sup>2</sup>, notando come le osservazioni (effettivi, cerchi verdi) siano poco localizzati intorno alla retta rossa, data la presenza di alcuni outlier significativi che ne modificano la stima. Questi outlier sono Cina, Stati Uniti e India, i tre Paesi maggiormente inquinanti.

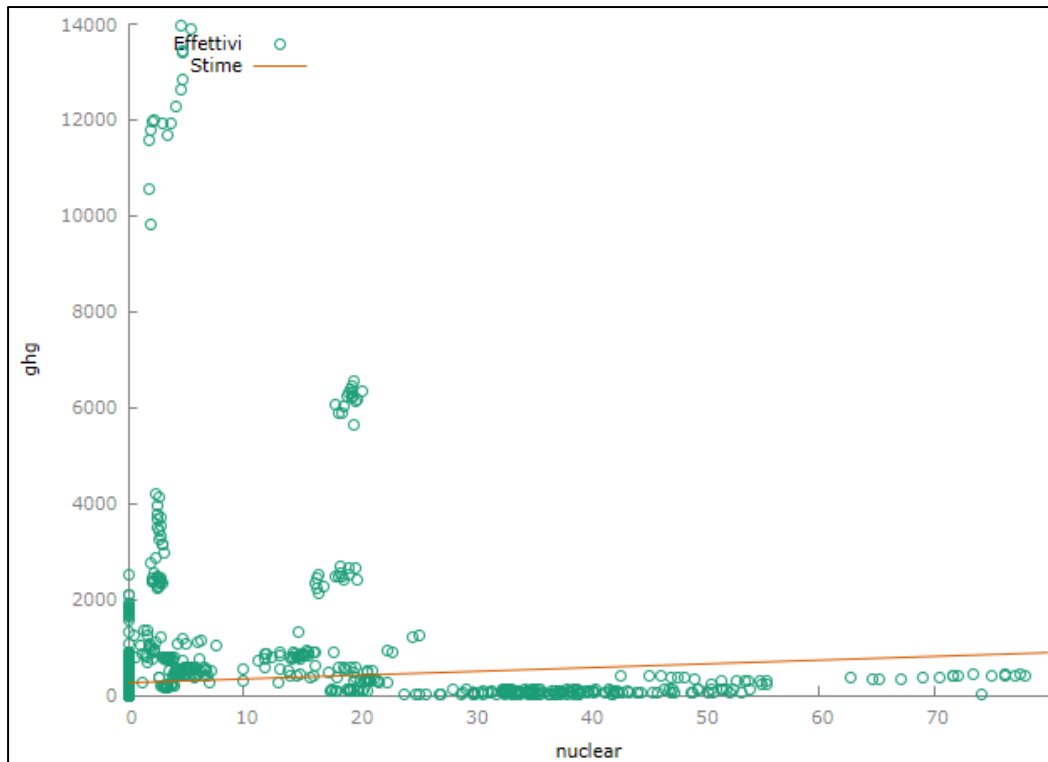


Grafico.7 – *ghg*: valori effettivi e stimati, rispetto a *nuclear*.

L'osservazione grafica interessante sta nell'apprezzare che le quote maggiori di energia nucleare coincidono con valori bassi di emissioni; infatti, le osservazioni più a destra del grafico (maggiore valore di *nuclear*) riguardano la Francia, primo Paese al mondo per l'utilizzo del nucleare nel proprio mix energetico. Inoltre, l'analisi è resa "poco" significativa dalla presenza di numerosi Paesi che non adottano il nucleare nel loro mix energetico (l'84% del dataset). Per attenuare questo dato che disturba l'analisi, si procederà più avanti con le opportune trasformazioni matematiche sulle variabili (si veda la successiva regressione "e"). Infine, riguardo i dati della Tabella.6 e il Grafico.1, l'assenza di significatività statistica non implica che il nucleare non abbia alcuna influenza sulle emissioni; piuttosto, in un modello a variabile singola, risulta difficile isolare l'effetto di *nuclear* senza considerare altri fattori (come i consumi). Inoltre, la relazione potrebbe essere non lineare o richiedere un periodo di latenza (l'incremento di centrali nucleari può necessitare di anni prima di ridurre sostanzialmente l'uso di carbone o gas).

## b) Altre regressioni lineari semplici.

Come indicato nella sezione precedente, si riporteranno solo i modelli di regressione maggiormente significativi; tuttavia, anche gli altri modelli, sebbene meno rilevanti in termini statistici, offrono spunti interessanti di riflessione:

- La variabile *renewables* è significativa al 90%, con un coefficiente negativo, indice del fatto che maggiore è la percentuale di rinnovabili nel mix energetico di un Paese, minori sono le emissioni di GHG. Tuttavia, questo non significa che le rinnovabili, da sole, rappresentano la soluzione alla decarbonizzazione o la risorsa che può ridurre le emissioni in poco tempo, in linea con quanto analizzato nel capitolo 1.
- La variabile *fossil* non arriva al 90% di significatività, questo potrebbe essere un indizio che fa pensare di dover includere altre variabili nel modello e non limitarsi ad una regressione lineare semplice. Certa è la positività del coefficiente, quindi maggiore è la quota di fonti fossili utilizzate da un Paese per l'approvvigionamento elettrico, maggiori sono le emissioni.
- La variabile *consum* è altamente significativa, oltre il 99% con l'ordine di grandezza del p-value di  $10^{-27}$ . L' $R^2$  di circa 0,95 indica che il 95% delle emissioni di GHG è spiegato dai consumi di energia primaria; dunque, il modello è in grado di catturare quasi tutta la variazione dei dati con la retta di regressione. La positività del coefficiente indica che le emissioni inquinanti maggiori sono osservate nelle nazioni con i consumi maggiori. I dati osservati sono in linea con l'analisi sulla correlazione proposta nel capitolo 2.
- La variabile *pop* è significativa al 99% con un  $R^2$  di 0,7, spiegando il 70% delle emissioni di gas clima alteranti. Inoltre, con un coefficiente positivo, gli Stati più popolosi inquinano maggiormente, dove gli outlier sono Cina, India e Stati Uniti, in linea con quanto osservato nel capitolo precedente in merito alla correlazione tra le variabili analizzate.
- Gli altri modelli di regressione lineare semplice con le variabili restanti sono poco significativi; pertanto, le altre variabili considerate nello studio saranno utili nei modelli successivi maggiormente significativi.

**c) Regressione lineare multipla: *ghg* – *nuclear*, *consum* e *d\_bitcoin*.**

Si presentano i dati relativi al modello Pooled OLS con le 2736 osservazioni, di cui 171 unità cross section per ogni anno ed una lunghezza delle serie storiche pari a 16 anni, dove la variabile dipendente è *ghg* e le variabili indipendenti *nuclear*, *consum* e *d\_bitcoin*.

Tabella.7 – Regressione lineare multipla con *nuclear*, *consum* e *d\_bitcoin*.

	Coefficienti $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$	Errore std.	Rapporto t	p-value
<b>const</b>	55,439	11,0274	5,027	$1,25 \cdot 10^{-6}$ ***
<b>nuclear</b>	-4,201	1,18	-3,561	0,0005 ***
<b>consum</b>	0,302	0,0225	13,39	$2,19 \cdot 10^{-28}$ ***
<b>d_bitcoin</b>	-39,37	36,689	-1,073	0,285
<b>RSS</b>			152.000.000	
<b>SER</b>			236,0992	
<b><math>\bar{R}^2</math></b>			0,955	

Con riferimento ai dati della Tabella.7, dopo aver controllato la validità delle quattro assunzioni chiave econometriche (con il metodo degli errori standard robusti Arellano) al fine di garantire l'inferenza casuale con il metodo dei minimi quadrati ordinari e verificato l'assenza di collinearità tra le variabili, si può osservare quanto segue:

1. L'intercetta  $\beta_0$  (statisticamente significativa oltre il 99%) indica che, quando *nuclear*, *consum* e *d\_bitcoin* sono nulli (situazione teoricamente estrema, in cui i consumi energetici sono nulli), le emissioni di GHG si attestano a circa 55 MtCO<sub>2</sub>e. Sebbene non sia uno scenario realistico, tale valore è utile per calibrare la retta di regressione e rappresenta il livello base di *ghg*.

2. La variabile *nuclear* presenta un coefficiente negativo e significativo (p-value valido al 99%). Ciò implica che, mantenendo i consumi totali di energia primaria stabili, un incremento di un punto percentuale nella quota di nucleare è associato a una riduzione statisticamente significativa di circa 4,2 MtCO<sub>2</sub>e nelle emissioni di GHG. Questo risultato è coerente con l'ipotesi che l'uso dell'energia nucleare nel mix energetico di un Paese, essendo a basse emissioni dirette, contribuisca a mitigare l'inquinamento, controllando il consumo energetico complessivo.
3. La variabile *consum* risulta estremamente significativa e con un coefficiente positivo. Indica che, a parità di quota nucleare, un aumento di 1 TWh nei consumi comporta un incremento di circa 0,3 MtCO<sub>2</sub>e di *ghg*. Questo valore risulta coerente con l'analisi già condotta nelle regressioni semplici e nell'analisi sulla correlazione estremamente positiva tra *consum* e *ghg* (pari a 0,967), per cui i Paesi con maggiori consumi energetici registrano in genere emissioni più alte.
4. La dummy *d\_bitcoin*, presenta un coefficiente negativo (-39,37), anche se non estremamente significativo (p-value = 0,285). L'effetto dell'adozione del mining di Bitcoin emerge in modo positivo sulle emissioni: se in un Paese è presente l'attività di mining, vi è una riduzione di circa 39 MtCO<sub>2</sub>e di emissioni di gas inquinanti. Quanto osservato risulta in linea con i paper scientifici analizzati nel capitolo 1, e con i casi studio presentati, dato che molte aziende di mining si posizionano laddove vi è spreco di energia attuando strategie di gas flaring e gas venting. Questo spiega anche l'assenza di un'alta significatività per la variabile: gli effetti su *ghg* catturati da *d\_bitcoin* potrebbero essere già riflessi in variabili più potenti (come *consum*) o dal peso ridotto del mining di Bitcoin rispetto all'intera economia energetica dei Paesi considerati.
5. Rispetto alle precedenti regressioni semplici, l'RSS è notevolmente inferiore, a indicare che l'introduzione congiunta di *nuclear* e *consum* riduce la varianza residua.



Il valore medio di scostamento dei residui ( $SER = 236,0992$ ) risulta essere molto più contenuto rispetto a modelli semplici (dove si osservavano valori anche oltre le migliaia), segnalando un notevole miglioramento nell'aderenza del modello ai dati osservati. Inoltre, la regressione spiega il 95,5% della variabilità di  $ghg$  (osservando  $1\bar{R}^2$ ). Si tratta di un valore estremamente elevato, che evidenzia come le variabili studiate riescano a catturare la quasi totalità delle differenze nelle emissioni di GHG.

Con  $d\_bitcoin$  nullo (trattandosi di una dummy assume valore 0 o 1 a seconda del suo significato), si ottiene il Grafico.8.

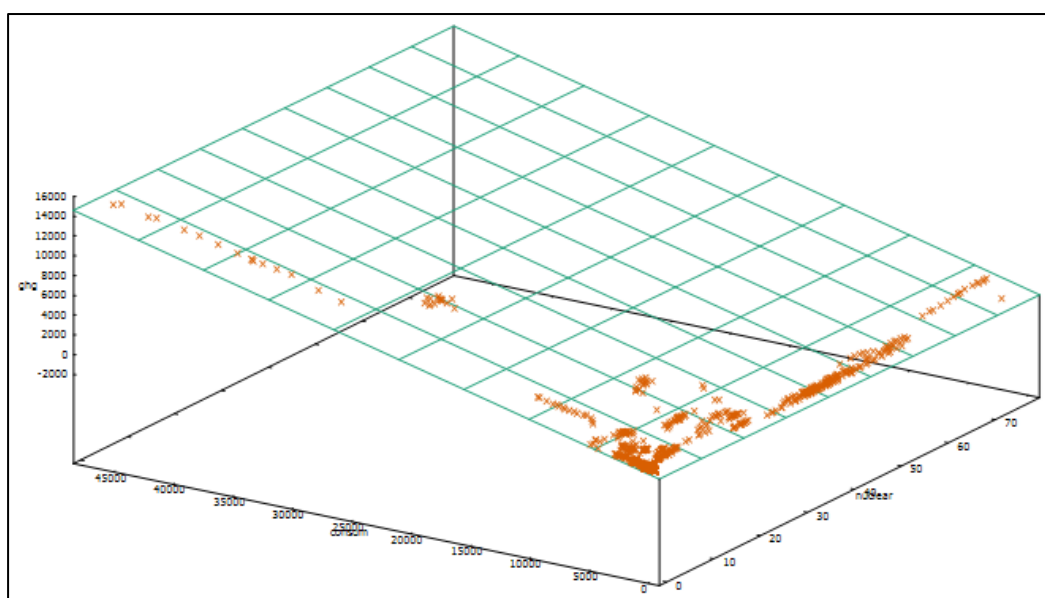


Grafico.8 – Iperpiano di  $ghg$ : valori effettivi e stimati, rispetto a *nuclear* e *consum*.

La funzione che esprime il modello appena discusso è siffatta:

$$ghg = 55,434 - 4,201 \text{ nuclear} + 0,302 \text{ consum} - 39,37 d\_bitcoin$$

Dal Grafico.8 si può osservare l'inclinazione negativa del piano (reticolato verde) che rappresenta il coefficiente negativo di *nuclear*, mentre la distribuzione delle osservazioni (x rosse) è in linea con quanto osservato nel Grafico.7. Inoltre, si può notare come le emissioni maggiori corrispondano ai valori più alti dei consumi, mentre i valori minori delle emissioni si riferiscano a quote di nucleare maggiori, a conferma di quanto analizzato.

#### d) Altre regressioni lineari multiple significative.

Questo punto si rende necessario al fine di riassumere le altre regressioni lineari multiple analizzate e ritenute significative.

- La regressione appena discussa, al netto dell'adozione di Bitcoin (*ghg* con *nuclear* e *consum*), può essere resa ancora più significativa aggiungendo al modello le due variabili di controllo considerate: *gdp\_percapita* e *pop*. Infatti, in questo caso la significatività di tutte le variabili è del 99%, i segni dei coefficienti di *nuclear* e *consum* rimangono concordi ai precedenti (di poco differenti in valore assoluto); interessante è analizzare il coefficiente di *gdp\_percapita* risultante negativo, questo è sintomo che un aumento del reddito per persona comporta una riduzione delle emissioni di gas clima alteranti. Inoltre, l'RSS diminuisce, aumentando la validità del modello, così come la riduzione del SER. Infine, l' $\bar{R}^2$  risulta in grado di spiegare il 97,6% del modello, estremamente alto e significativo. Riguardo a *pop* vale l'analisi condotta nel capitolo 2 riguardo la correlazione elevata e positiva con *ghg*: maggiore è la popolazione e maggiori saranno consumi ed emissioni.
- Una regressione lineare multipla tra *renewables* e *consum* non si avvicina neanche all'elevata significatività della regressione "c". Questa rappresenta l'ulteriore conferma che il nucleare è la soluzione più pulita, sicura ed economica per la decarbonizzazione mondiale. Discorso analogo per la variabile *fossil*. In un modello, invece, che includa tutte e tre le forme da cui si può ricavare elettricità e considerando anche i consumi, le variabili significative risultano rimanere *nuclear* e *consum*, mentre *renewables* e *fossil* presentano un p-value non significativo.
- Il modello di regressione lineare multipla con tutte le variabili analizzate è in linea con quanto osservato finora: significatività elevata di *nuclear*, *consum* e *pop*, coefficienti negativi di *nuclear*, *gdp\_percapita* e *d\_bitcoin*, RSS e SER minori dei modelli con 3 variabili, indice di errori minori e maggiore accuratezza nella stima.

Infatti, l' $\bar{R}^2$  spiega oltre il 97% delle emissioni di GHG per i Paesi negli anni considerati. In questo caso è interessante proporre il grafico ottenuto dal modello (Grafico.9) che considera le emissioni effettive e stimate, confrontandole sullo stesso piano.

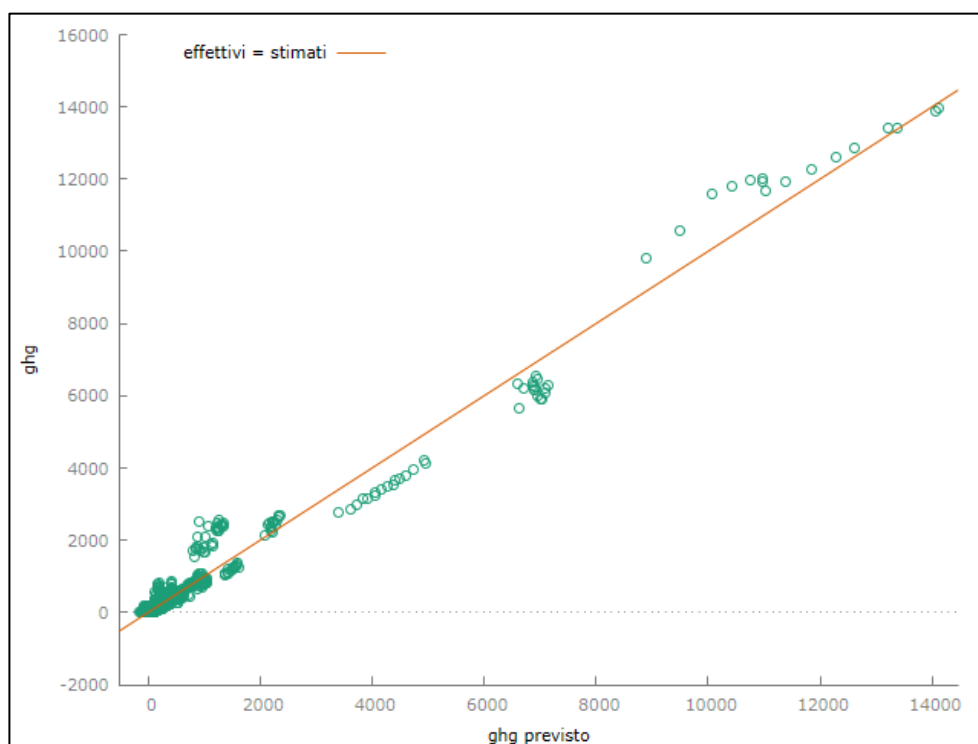


Grafico.9 – Modello di regressione con tutte le variabili considerate nello studio: valori effettivi e stimati di *ghg*.

Si nota come le osservazioni effettivamente registrate (cerchietti verdi) si distribuiscano uniformemente intorno alla loro stima (retta di regressione rossa), spiegando graficamente l' $\bar{R}^2$  elevato.

#### e) Regressione non lineare logaritmica, log-log: $l\_ghg - l\_nuclear$ .

Si presentano i dati relativi al modello Pooled OLS con 451 osservazioni (il 16% del totale), di cui 30 unità cross section per ogni anno ed una lunghezza delle serie storiche da un minimo di 1 ad un massimo di 16 anni, dove la variabile dipendente è il logaritmo naturale di *ghg* (denotata con  $l\_ghg$ ) e la variabile indipendente il logaritmo naturale di *nuclear* (denotata con  $l\_nuclear$ ).

La trasformazione proposta per le due variabili è utile al fine di ridurre l'impatto degli outlier e delle asimmetrie emerse, spiegando la riduzione delle osservazioni e delle unità cross section<sup>73</sup>. Inoltre, trasformando  $ghg$ , si avrà una conseguente variazione nella sua media e nel suo SQM, pertanto proposti.

Tabella.8 – Regressione non lineare log-log tra  $l\_ghg$  e  $l\_nuclear$ .

	Coefficienti $\beta_0$ e $\beta_1$	Errore std.	Rapporto t	p-value
<b>const</b>	7,956	0,51	15,61	$1,19 \cdot 10^{-15}$ ***
<b><math>l\_nuclear</math></b>	-0,82	0,188	-4,359	0,0001 ***
<b>Media <math>l\_ghg</math></b>			5,822	
<b>SQM <math>l\_ghg</math></b>			1,682	
<b>RSS</b>			843,794	
<b>SER</b>			1,371	
<b><math>\bar{R}^2</math></b>			0,336	

Quanto segue avviene dopo aver controllato la validità delle quattro assunzioni chiave econometriche (con il metodo degli errori standard robusti Arellano) al fine di garantire l'inferenza casuale con il metodo dei minimi quadrati ordinari e verificato l'assenza di collinearità tra le variabili. Questo modello è proposto in risposta alle osservazioni emerse nell'analisi della regressione "a". Pertanto, si può osservare quanto segue:

1. Quando  $l\_nuclear = 0$  (ossia  $nuclear = 1$  in termini originali, perché  $\ln(1)=0$ ), l'aspettativa di  $l\_ghg$  risulta di 7,956. Ritrasponendo in forma esponenziale, ciò indica che le emissioni di GHG sono circa 2,85 MtCO<sub>2</sub>e.

<sup>73</sup> Si ricorda che il logaritmo di 0 (qualunque base abbia) non è definito nell'insieme dei numeri reali; pertanto, gli Stati con quota di nucleare nulla sono esclusi per definizione.

Naturalmente, in questo contesto, l'interpretazione dell'intercetta è soltanto un riferimento di base e può non rappresentare un caso empirico comune, ma rimane comunque significativa nel determinare l'ordinata d'origine del modello.

2. Il coefficiente  $\beta_l = -0,82$  indica che un incremento dell'1% in *nuclear* (in senso relativo, poiché parliamo di logaritmi) è associato a un decremento dello 0,82% nelle emissioni di GHG, a parità di altre condizioni. In altri termini, si evidenzia un'elasticità delle emissioni rispetto alla quota nucleare: se *nuclear* cresce, *ghg* diminuisce. Questo coefficiente risulta statisticamente rilevante e coerente con l'ipotesi che l'energia nucleare contribuisca a ridurre le emissioni totali.
3. RSS e SER dimostrano un certo livello di variabilità residua ancora presente, ma inferiore rispetto all'analisi in scala lineare per i medesimi dati. Il modello spiega circa il 33,6% della variabilità di  $\ln ghg$ . Seppur non elevatissimo, questo  $\bar{R}^2$  risulta comunque notevole nel contesto di un modello a singolo regressore su un campione ridotto, e decisamente maggiore rispetto a quello emerso dalla regressione "a". Infine, la natura log-log attenua gli outlier di *ghg* e *nuclear*, rendendo i risultati meno influenzati dai valori estremi e più validi.

L'equazione della retta di regressione ha la forma:

$$\ln ghg = 7,956 - 0,82 \ln nuclear$$

Il grafico successivo (Grafico.10) mostra la relazione inversa tra le variabili: quote maggiori di elettricità ricavata dall'utilizzo di energia nucleare corrispondono ad emissioni di GHG minori, a conferma dell'ipotesi chiave di tutto questo studio: l'energia nucleare è la fonte più pulita, sicura ed economica di ricavare energia ed è la soluzione più rapida per il raggiungimento della decarbonizzazione globale, in linea con la letteratura analizzata (Capitolo 1).

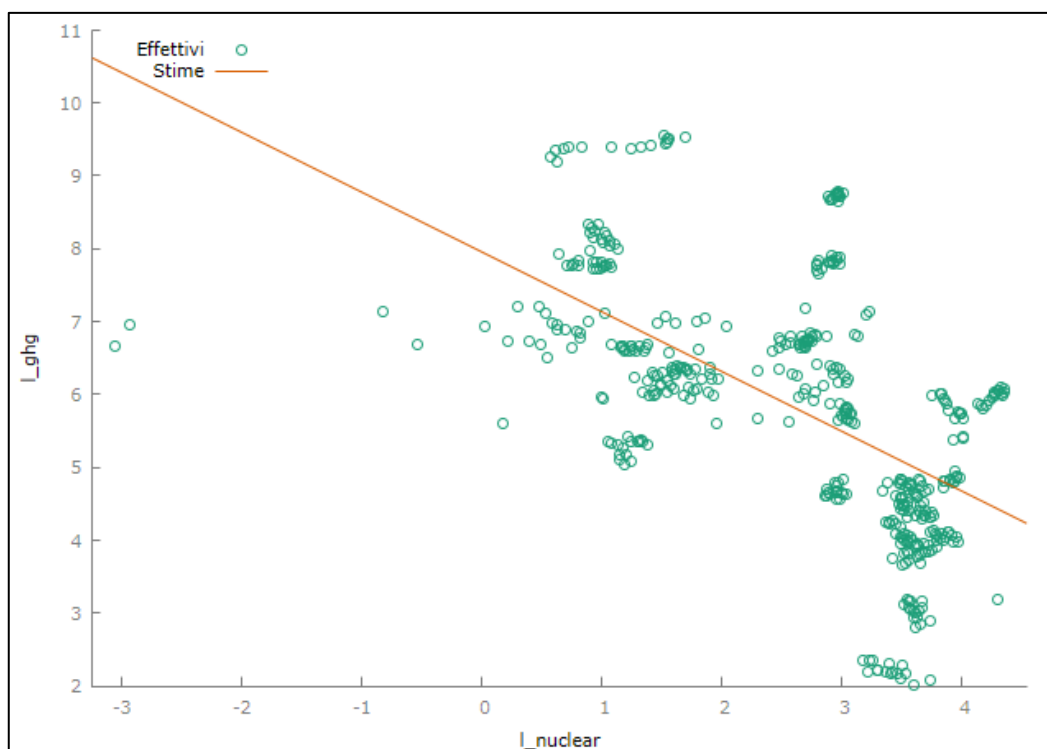


Grafico.10 –  $l\_ghg$ : valori effettivi e stimati, rispetto a  $l\_nuclear$ .

Si rende noto che sono state analizzate tutte le trasformazioni matematiche su ogni variabile al fine di comprendere quale fosse la più significativa da utilizzare nel seguito dell'elaborato; la conclusione è che le variabili siffatte sono già significative, più delle loro trasformazioni<sup>74</sup>.

#### **f) Regressione con interazione tra *consum* e *d\_bitcoin*.**

Si presentano i dati relativi al modello Pooled OLS con le 2736 osservazioni, di cui 171 unità cross section per ogni anno ed una lunghezza delle serie storiche pari a 16 anni, dove la variabile dipendente è *ghg* e le variabili indipendenti *consum*, *d\_bitcoin* e *int\_conbi*, ossia l'interazione tra *consum* e *d\_bitcoin*, ottenuta come moltiplicazione tra le due variabili ( $int\_conbi = consum \cdot d\_bitcoin$ ). L'interazione tra variabili è utile per cercare di catturare come l'una influenzi l'altra.

<sup>74</sup> Sono stati considerati anche modelli polinomiali ma non presentati poiché poco rilevanti. Inoltre, la trasformazione logaritmo sulla variabile più impattante dello studio (*consum*) ne abbassa la significatività e pertanto non è considerata.

Tabella.9 – Regressione con interazione tra *consum* e *d\_bitcoin*.

	Coefficienti $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$	Errore std.	Rapporto t	p-value
<b>const</b>	30,953	7,358	4,207	$4,18 \cdot 10^{-5}$ ***
<b>consum</b>	0,36	0,00636	56,55	$3,66 \cdot 10^{-112}$ ***
<b>d_bitcoin</b>	-20,69	35,572	-0,582	0,562
<b>int_conbi</b>	-0,0734	0,0242	-3,034	0,0028 ***
<b>RSS</b>			128.000.000	
<b>SER</b>			216,63	
<b><math>\bar{R}^2</math></b>			0,962	

Con riferimento ai dati della Tabella.9, dopo le abituali analisi su eteroschedasticità ed errori, si può osservare quanto segue:

1.  $\beta_0$  rappresenta il livello previsto di *ghg* quando  $consum = 0 = d\_bitcoin$  (cioè Paesi dove non vi è mining di Bitcoin o una conoscenza irrilevante sul tema e con consumi energetici nulli, scenario teorico). Il valore di circa 31 MtCO<sub>2</sub>e, seppur non realistico sul piano economico, è significativo per la regressione e stabilisce un riferimento base delle emissioni inquinanti.
2. La variabile *consum* mantiene un coefficiente fortemente positivo e rilevante. A parità di *d\_bitcoin* e della sua interazione, l'aumento di 1 TWh si associa a un incremento di 0,36 MtCO<sub>2</sub>e nelle emissioni di GHG, come di consueto.
3. Come in precedenti analisi, *d\_bitcoin* non risulta particolarmente significativa. In assenza dell'effetto congiunto con *consum* (catturato dall'interazione *int\_conbi*), la variabile mostra un coefficiente negativo, indicando che, in presenza di Bitcoin, vi si associa un decremento delle emissioni per i motivi già discussi.
4. Un  $\bar{R}^2$  di 0,962 indica che il modello spiega il 96,2% della variabilità nelle emissioni di GHG.

L'aggiunta di *int\_conbi* migliora ulteriormente l'adattamento rispetto al modello con *consum* e *d\_bitcoin* senza interazione (RSS e SER si riducono, mentre  $\bar{R}^2$  aumenta).

5. L'interazione tra *consum* e *d\_bitcoin*, ossia *int\_conbi*, è invece significativa e negativa. Ciò significa che, per Paesi dove *d\_bitcoin* = 1 (presenza rilevante di Bitcoin), l'effetto di un ulteriore aumento di *consum* sulle emissioni di GHG è ridotto di circa 0,07 MtCO<sub>2</sub>e rispetto ai Paesi in cui Bitcoin non è una realtà affermata. In altri termini, l'associazione tra consumi energetici e le emissioni sembra attenuarsi nei Paesi “*bitcoin-friendly*”, secondo i dati di questo modello. Questo risultato può riflettere come, in alcuni Paesi “pro-Bitcoin”, il mining potrebbe focalizzarsi su fonti energetiche meno inquinanti (idroelettrico, geotermico e nucleare); inoltre, i consumi totali includono una componente più efficiente, riducendo l'elasticità delle emissioni. In ogni caso, la dummy da sola resta non significativa, ma il suo effetto si manifesta in combinazione con *consum*. L'analisi attuale fornisce un'indicazione statistica che, a parità di consumi, la presenza di Bitcoin non incrementa necessariamente le emissioni e potrebbe, in casi specifici, associarsi a un leggero effetto mitigante, sebbene la causalità non sia stabilita.

Doverosa digressione in merito all'interazione tra *nuclear* e *d\_bitcoin*, anche per dar voce ai casi studi inerenti la sinergia tra queste due tecnologie. Sebbene la variabile d'interazione non risulti particolarmente significativa, il coefficiente è negativo, il che vuol dire che in Paesi dove è presente il mining di Bitcoin e dove vi è una quota di energia nucleare importante, le emissioni di GHG sono mitigate dall'interazione tra queste due realtà. Inoltre, nel modello, la variabile *d\_bitcoin* acquista la massima significatività e un coefficiente negativo, confermando come nella variabile *consum* sia catturata, in minima parte, la presenza del mining di Bitcoin. Inoltre, da tutti i modelli studiati, emerge come la presenza di Bitcoin in uno Stato incida positivamente sulle emissioni di gas serra (coefficiente negativo). Da qui nasce la necessità di approfondire i temi affrontati e pertanto si propongono i modelli panel successivi.



## 3.2 Modelli panel

---

I modelli panel (usati per dati longitudinali) sono strumenti statistici ed econometrici progettati per analizzare dati che contengono una dimensione trasversale (ossia le unità cross section, nel caso specifico i Paesi del mondo) e una dimensione temporale (ossia le serie storiche, nel caso specifico i 16 anni studiati). Nonostante nell'analisi finora condotta il dataset è stato sempre considerato come panel (i modelli precedenti erano tutti Pooled OLS, ovvero il metodo dei minimi quadrati ordinari applicato a dati panel), i modelli panel consentono di catturare i fattori non osservati nei precedenti modelli e che sono peculiari di ciascuna unità statistica, riducendo il *bias* da omissione di variabili rilevanti. Tali modelli possono essere affrontati tramite due tecniche statistiche, cosiddette “ad effetti fissi” o “ad effetti casuali”. Per determinare quale dei due metodi sia preferibile va analizzato il p-value del test di Hausman osservato nel “modello ad effetti casuali”: se questo p-value è minore di 0,05 allora si preferiscono gli effetti fissi. Per non rendere troppo lunga la parte teorica di questa tesi<sup>75</sup>, è stato preventivamente effettuato il test di Hausman e si rende noto che saranno presentati i panel ad effetti fissi. Inoltre, grazie all'analisi condotta nei modelli di regressione precedenti (sotto-capitolo 3.1) e le conclusioni emerse dall'analisi della correlazione tra le variabili (sotto-capitolo 2.2), sono stati utili per determinare quali variabili siano maggiormente significative e capaci di stimare al meglio le emissioni di GHG, comprendendo da cosa siano causate e da cosa siano influenzate. Per questo motivo è utile un breve *recap* di come si sia giunti a tali conclusioni:

- Si è visto come *nuclear*, in un modello di regressione lineare semplice (regressione “a”), non si capace di stimare correttamente *ghg*, ma inserendo nella regressione *consum*, ecco che la quota di nucleare acquista significatività.

---

<sup>75</sup> Si ricorda che per ogni termine tecnico incontrato si possono avere delucidazioni in merito semplicemente da una rapida ricerca online (si consiglia il sito [https://it.wikipedia.org/wiki/Pagina\\_principale](https://it.wikipedia.org/wiki/Pagina_principale)), oppure per un approfondimento teorico maggiore si consiglia la lettura del libro di J. H. Stock & M. W. Watson “*Introduzione all'econometria*” (presente in bibliografia).

Per avere la massima rilevanza in un modello che includa solo la quota di nucleare, si è visto necessario trasformare le variabili (regressione “e”); questo per attenuare la presenza di outlier e asimmetrie.

- Al fine di stimare correttamente le emissioni inquinanti, *renewables* e *fossil* sono poco rilevanti, nonostante i combustibili fossili presentino un coefficiente positivo: utilizzare le fonti fossili per ricavare elettricità è ampiamente inquinante. Un'altra considerazione riguarda il fatto che le rinnovabili, da sole, non rappresentano la soluzione alla decarbonizzazione.
- Il coefficiente di determinazione maggiore lo si trova nei modelli dove sono inclusi i consumi, sintomo che, per una corretta stima delle emissioni, la variabile indipendente *consum* è cruciale e da includere nei modelli.
- Alta significatività anche per *pop*, che da sola spiega il 70% di *ghg*. Invece, il reddito pro-capite è significativo se usato assieme ad altri modelli con un coefficiente basso, in valore assoluto, ma negativo, indice del fatto che la variabile *gdp\_percapita* influenza le emissioni a ribasso.
- Le emissioni di gas clima alteranti sono stimate al 97,6% con una significatività del 99% in un modello di regressione lineare multipla che includa *nuclear*, *consum*, *gdp\_percapita* e *pop*, con errori minori rispetto ad altri modelli.
- La variabile dummy *d\_bitcoin*, da sola, è significativa al 99% ma poco rilevante dal punto di vista reale trattandosi di una variabile che, a seconda del suo significato, assume valori 0 e 1. Pertanto, è stata studiata in relazione ad altre variabili risultando non estremamente rilevante (si è visto che i suoi effetti sono catturati in larga parte da *consum* e impattano relativamente nel bilancio energetico di uno Stato), ma la sua interazione con i consumi di energia risulta altamente significativa (al 99%) con un coefficiente negativo, sintomo che i Paesi dove Bitcoin è una realtà affermata inquinano e consumano meno rispetto a Paesi dove non vi è un'adozione dell'asset (regressione “f”).

Ricordate tali considerazioni, si possono introdurre i successivi modelli panel.

**a) Panel ad effetti fissi con le variabili più significative.**

Dalle conclusioni mosse finora, emerge che le variabili indipendenti maggiormente significative sono *nuclear* con *consum*, *gdp\_percapita*, *pop* e *int\_conbi*, ovvero l'interazione tra *consum* e *d\_bitcoin* (ottenuta come prodotto tra le due variabili:  $int\_conbi = consum \cdot d\_bitcoin$ ), in modelli di regressione dove la variabile dipendente è sempre *ghg*. Pertanto, si presentano i dati relativi al modello panel ad effetti fissi usando con le 2736 osservazioni, di cui 171 unità cross section per ogni anno ed una lunghezza delle serie storiche pari a 16 anni.

Tabella.10 – Panel effetti fissi con variabili più significative.

	Coefficienti	Errore std.	Rapporto t	p-value
<b>const</b>	91,928	42,715	2,152	0,0328 **
<b>nuclear</b>	-0,052	0,632	-0,0823	0,9345
<b>consum</b>	0,208	0,00879	23,63	$1,32 \cdot 10^{-55}$ ***
<b>gdp_percapita</b>	-0,000594	0,000315	-1,89	0,0608 *
<b>pop</b>	$9,23 \cdot 10^{-7}$	$1,001 \cdot 10^{-6}$	0,92	0,362
<b>int_conbi</b>	-0,0114	0,00438	-2,59	0,0104 **
<b>RSS</b>			3.836.767	
<b>SER</b>			38,714	
<b><math>\bar{R}_{LSDV}^2</math></b>			0,999	

Adottando il metodo panel ad effetti casuali Swamy-Arora, l'ipotesi nulla del Test di Hausman è che le stime GLS siano consistenti, ma la statistica test asintotica, da cui si ottiene una  $\text{Chi-quadro}(5) = 223,934$  con  $p\text{-value} = 2,134 \cdot 10^{-46}$ , valore chiaramente minore di 0,05, ha suggerito di rigettare l'ipotesi nulla di Hausman e di conseguenza si è ritenuto maggiormente valido presentare il modello panel ad effetti fissi.

Dunque, con riferimento ai dati della Tabella.10, dopo aver diagnosticato, con il test di BKW, l'assenza di multicollinearità sostanziale tra le variabili indipendenti inserite nel modello e la quasi-dipendenza lineare forte tra esse, si è proceduto alla verifica delle assunzioni chiave del modello panel a effetti fissi, adottando errori standard robusti (di tipo Arellano) per assicurare un'inferenza corretta nonostante possibili violazioni di omoschedasticità o autocorrelazione, si può osservare quanto segue:

1. Il valore stimato di  $\beta_0$  (91,928) è significativo al 95%. Ciò indica che, quando tutte le variabili indipendenti sono nulle, *ghg* si attesta su circa 91,9 MtCO<sub>2e</sub>, una volta rimossi gli effetti specifici di ciascun Paese.
2. Il coefficiente  $\beta_1$  di *nuclear* (-0,052) non risulta statisticamente significativo nel modello a effetti fissi, contrariamente a quanto visto in alcuni modelli Pooled OLS dove non si consideravano gli effetti specifici di Paese. Ciò potrebbe significare che, dopo aver “fissato” le differenze tra Paesi e controllato per *consum*, l'effetto di *nuclear* sulle emissioni non emerge in modo chiaro, seppur risulta una diminuzione delle emissioni di GHG negli Stati dove vi è una percentuale non nulla di elettricità ricavata grazie all'energia nucleare ( $\beta_1 < 0$ ).
3. Il coefficiente estremamente significativo di *consum* ( $\beta_3 = 0,208$  con p-value rilevante al 99%) conferma che i consumi totali di energia primaria rappresentano il fattore principale per spiegare le emissioni di gas serra, anche nel modello a effetti fissi
4. La variabile *gdp\_percapita* risulta significativa al 90% con un coefficiente negativo ( $\beta_3 = -0,000594 < 0$ ). Ciò indica che, a parità di consumi e delle altre variabili, un aumento marginale del reddito pro-capite è associato a un lieve calo delle emissioni di gas clima alteranti. Ciò potrebbe riflettere una transizione verso settori a minore intensità carbonica nei Paesi più ricchi, oppure politiche ambientali più rigorose.
5. Riguardo *pop* ( $\beta_4 = 9,23 \cdot 10^{-7}$  e p-value non statisticamente significativo), una volta considerati gli effetti fissi di un Paese e controllato per i consumi totali, la popolazione non incide significativamente sulle emissioni.

Questo risultato segnala che *pop* potrebbe essere fortemente correlata con caratteristiche già assorbite negli effetti fissi (dimensione del Paese, infrastruttura energetica, abitudini di consumo) o con *consum* stesso.

6. L'effetto interattivo tra i consumi e la dummy relativa a Bitcoin è negativo e rilevante ( $\beta_5 = -0,0114$  e p-value = 0,0104 significativo al 95%). Ciò implica che, nei Paesi dove avviene mining di Bitcoin o dove l'asset è conosciuto dalla popolazione, i consumi risultano minori così come le emissioni inquinanti, in linea con la letteratura e i precedenti modelli analizzati.
7. Un  $\bar{R}_{LSDV}^2$  vicino a 0,999 appare estremamente elevato. Nel contesto di un modello a effetti fissi, ciò indica che quasi tutta la variabilità di *ghg* è spiegata dalla combinazione di regressori e dagli effetti fissi dei Paesi nel tempo. Ciò è osservabile dal Grafico.11.

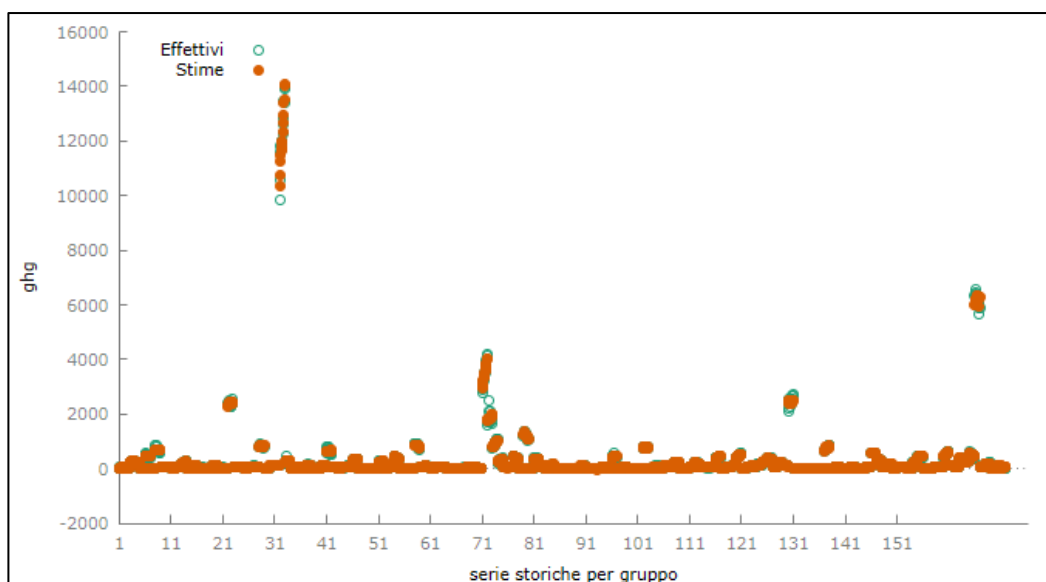


Grafico.11 – *ghg*: valori effettivi e stimati, nel modello panel ad effetti fissi.

Dal Grafico.11 si nota come le stime delle emissioni di GHG (cerchietti rossi) siano distribuite sui valori effettivamente osservati nel dataset (cerchietti verdi), a conferma dell'elevato  $\bar{R}_{LSDV}^2$ .

## b) Altri modelli panel.

Al fine di non rendere pesante la trattazione, si propone un riassunto dettagliato dell'analisi di altri modelli panel da cui si possono trarre conclusioni interessanti. Inoltre, si specifica che i modelli panel successivi sono sempre ad effetti fissi, questo perché il p-value del test di Hausman è risultato sempre minore di 0,05 indicando che gli effetti fissi sono più consistenti ed efficienti rispetto agli effetti casuali. Pertanto, con gli effetti fissi si cattura meglio la correlazione tra le caratteristiche della variabile dipendente (*ghg*, emissioni di gas serra) e i regressori (le variabili indipendenti e dummy considerate).

- È stato analizzato il panel “*a*” includendo le dummy temporali<sup>76</sup>. L'anno con una significatività statistica del 95% risulta essere solo il 2012, mentre al 90% vi sono il 2010 e il 2011. Gli altri anni non presentano un p-value rilevante, anche se è interessante notare come dal 2009 al 2019 i coefficienti delle dummy temporali sono positivi, mentre divengono negativi dal 2020 al 2024. Questo perché nel primo blocco di anni si è osservata una crescita generalizzata sui piani economico ed industriale, aumentando le emissioni ed i consumi, mentre il secondo blocco inizia non a caso con l'anno pandemico che ha ridotto emissioni e consumi generali (si veda sotto-capitolo 2.3) e dal quale molte nazioni hanno iniziato ad investire in rinnovabili e nucleare, contribuendo ad una riduzione delle emissioni inquinanti. Inoltre, anche il progresso tecnologico ed industriale è incrementato negli ultimi 5 anni, con processi produttivi sempre più green grazie all'aumentare delle politiche ambientali, accordi internazionali e incentivi statali, vedendo un aumento dei trasporti elettrici e della digitalizzazione, abbassando conseguentemente anche i consumi.
- Un fattore non ancora analizzato nei modelli riguarda la presenza delle politiche ambientali (espresse nella variabile *d\_policy*).

---

<sup>76</sup> Le variabili dummy temporali sono usate come discriminante per i periodi di tempo osservati nel modello panel, assumono valore 1 solo per l'anno interessato e 0 per i restanti. Esse sono utili per determinare gli impatti delle variabili considerate nel modello in uno specifico anno.

Questo perché in tutti i modelli analizzati il p-value di questa variabile non è mai risultato statisticamente significativo e capace di catturare la variabilità delle emissioni, ma ora è utile trarre comunque delle conclusioni. Inserendo *d\_policy* in un modello di regressione Pooled OLS con le variabili più significative (seguendo le accortezze specificate nel sotto-capitolo 3.1), si nota come la significatività di tutte le variabili è del 99% (solo *gdp\_per capita* ha un p-value rilevante al 95%) fuorché *d\_policy*, mentre i coefficienti mantengono il segno studiato nel panel “a”. Interessante notare come *int\_conbi* aumenti di significatività e in valore assoluto anche il coefficiente, una volta considerate le politiche ambientali nel modello. Questo è sintomo della rilevanza che una corretta regolamentazione statale possa incidere su emissioni e consumi, dunque sugli sprechi di energia, mitigandoli. Curioso è il coefficiente positivo di *d\_policy*, segnalando come la presenza di una politica ambientale volta a ridurre le emissioni, in realtà le aumenti (e non di poco, circa 48 MtCO<sub>2</sub>e). Quanto detto può trovare una possibile giustificazione: si è visto che nel 2009 nessuno Stato adottava una politica ambientale, inficiando sulle emissioni, dal 2010 al 2019 solo in pochi Stati era presente una regolamentazione green, solo dopo il 2020 si è raggiunto un numero rilevante di Paesi attenti all'inquinamento e al clima, ma essi, purtroppo, rappresentano solo il 36% del campione analizzato, spiegando anche la bassa significatività della variabile. Inserendo *d\_policy* nel panel “a” si osserva quanto appena discusso: *int\_conbi* aumenta la significatività al 99% e il coefficiente rimane negativo, *d\_policy* non è estremamente rilevante con un coefficiente positivo; le conclusioni sono le medesime. Includendo anche le dummy temporali, il 2020 risulta significativo al 90% con coefficiente negativo, indicando come sia un anno sofferto ma di svolta sul piano ambientale.

- In un modello panel che consideri tutte le variabili considerate nello studio, la più significativa rimane *consum* (capace di catturare la variabilità di *ghg* con un'accuratezza del 99%), le altre mostrano un p-value poco rilevante<sup>77</sup>.

---

<sup>77</sup> Si ricorda che gli effetti di *d\_bitcoin* su *ghg* si sono visti inclusi in *consum*, spiegando la poca significatività della dummy in presenza della variabile più “potente”.

È utile però è soffermarsi sui coefficienti di *nuclear* e *d\_bitcoin*: entrambi risultano negativi confermando ulteriormente l'ipotesi centrale di tutto questo studio, in più il coefficiente di *d\_bitcoin* indica che nei Paesi dove Bitcoin è una realtà affermata, a parità delle altre variabili, si registra una riduzione delle emissioni inquinanti di circa 16,8 MtCO<sub>2</sub>e: Bitcoin è green.

Il mining di Bitcoin si rivela una risorsa utile per ridurre le emissioni, risultando, per ora, l'unica industria che ha serie possibilità di diventare carbon negative, grazie ai metodi di gas flaring e venting già realtà. Inserendo l'interazione tra l'adozione di Bitcoin e i consumi (*int\_conbi*), la variabile presenta massima significatività e coefficiente negativo, indicando come Bitcoin rimane anche una soluzione che mitiga i consumi abbassando gli sprechi di energia, dato che si è visto (capitolo 1) che l'industria del mining di Bitcoin si posiziona laddove vi è surplus energetico proveniente da rinnovabili o nucleare, incentivando il loro uso grazie alla produzione di assoluta scarsità digitale di altissima rilevanza socioeconomica.

Per tutti i modelli panel ad effetti fissi analizzati,  $\bar{R}_{LSDV}^2$  resta sulla soglia del 99,9%, RSS e SER simili al panel "a" indicando che la bontà di adattamento e la distribuzione degli errori rimane stabile e concorde per ogni modello. Quanto concluso fino a questo punto, spiana la strada per le ultime considerazioni finali.



## Conclusioni, criticità, prospettive

---

L'elaborato appena discusso si concentra sull'impatto ambientale e sul consumo energetico connessi a due tecnologie apparentemente distanti: Bitcoin ed energia nucleare. L'ipotesi di fondo è che la sinergia di queste due tecnologie possa portare benefici significativi in termini di decarbonizzazione e maggiore efficienza energetica, contribuendo anche a ridurre le disuguaglianze socioeconomiche. Dopo aver discusso la letteratura esistente in argomento Bitcoin ed energia nucleare, l'analisi successiva è avvenuta attraverso due *step* fondamentali:

1. Impostazione del modello economico: è stato chiarito il quadro teorico, con la selezione delle variabili di interesse e le ipotesi sottostanti. Sono state illustrate le metodologie usate per la raccolta dei dati utili per lo studio (periodo temporale 2009-2024, 171 Paesi del mondo, 2736 osservazioni totali). Si sono chiariti i motivi che hanno portato alla scelta di determinate variabili (emissioni di GHG, mix energetico, consumi di energia primaria, PIL pro-capite, popolazione, politiche ambientali e adozione di Bitcoin).
2. Impostazione del modello econometrico: è stata impostata e svolta un'analisi econometrica avanzata, sia di regressione multipla sia di regressione panel, alla ricerca di effetti e connessioni tra le variabili selezionate e le emissioni di gas serra. Si sono individuati i principali *driver* delle emissioni, mettendo in luce come e in che misura il mining di Bitcoin e l'adozione di fonti nucleari possano contribuire ad abbattere le emissioni stesse.

Lo studio fa leva su un dataset composto da dati a livello di singolo Paese su un periodo di 16 anni. Il 2009 è stato scelto come anno di avvio di Bitcoin, mentre il 2024 è l'ultimo anno per cui sono disponibili (o stimabili) le principali grandezze utilizzate. La variabile dipendente, su cui si basa tutta l'analisi svolta, è l'emissione di GHG da parte di ogni singolo Stato. Questo al fine di capire come alcune grandezze influiscano sulle emissioni e cercare di trovare una soluzione alla loro mitigazione per combattere il dilagante problema del cambiamento climatico.

Le altre variabili indipendenti, e dummy, sono state pensate per rappresentare i principali elementi macroeconomici e ambientali che incidono sulle emissioni, così da poter trarre conclusioni attendibili sul comportamento inquinante e sul potenziale contributo del mining di Bitcoin e del nucleare nel contenere tale fenomeno. È stata effettuata un'analisi preliminare sulle statistiche descrittive e sulla correlazione delle singole variabili che ha evidenziato come le emissioni di gas serra presentino una varianza molto ampia e una correlazione forte con i consumi energetici e la popolazione degli Stati. I consumi totali di energia primaria mostrano anch'essi una notevole dispersione; il mix energetico, invece, presenta valori medi significativi; infatti, in molti Paesi del campione prevalgono le fonti fossili, sebbene in alcuni vi sia grande presenza di rinnovabili. Infine, viene analizzata la situazione mondiale delle variabili, denotando una grave crisi demografica in atto e delle emissioni inquinanti in costante aumento che impattano negativamente nell'ecosistema mondiale, su ogni piano (clima, economia, società, ecc.). Successivamente si opera l'analisi econometrica, suddivisa principalmente nei modelli di regressione lineare, che consentono una prima valutazione dell'impatto di ciascuna variabile sulle emissioni e nei modelli panel (a effetti fissi), i quali permettono di cogliere sia la dimensione temporale sia le peculiarità di ogni singolo Paese, controllando per effetti non osservabili e caratteristiche specifiche. Il lavoro mostra come la regressione lineare sulle emissioni totali di gas serra evidenzia la centralità dei consumi di energia primaria nell'aumento delle emissioni stesse. Crescendo la domanda energetica complessiva, cresce la quantità di CO<sub>2</sub>e rilasciata, specialmente in Paesi con un mix energetico ancora basato sui combustibili fossili. Si notano poi effetti positivi del nucleare nel contenimento delle emissioni: i Paesi con maggiore quota di nucleare mostrano in media emissioni inferiori, a parità di consumi, rafforzando l'idea che l'energia nucleare rappresenti una fonte stabile, competitiva e a bassissimo impatto di gas a effetto serra. Un altro aspetto rilevante riguarda l'adozione di Bitcoin, correlata negativamente con le emissioni: nei Paesi in cui Bitcoin è una realtà affermata, si osserva un leggero contenimento delle emissioni, potenzialmente connesso all'incentivo a utilizzare energia in eccesso (o rinnovabile) per il mining.

Le conclusioni finali del modello panel a effetti fissi, che isola le peculiarità di ogni Paese, confermano alcuni punti principali:

- I consumi restano i più influenti nel determinare le emissioni complessive: un aumento dei consumi energetici primari porta a un proporzionale aumento delle emissioni.
- Il mix energia nucleare e rinnovabile mostra effetti negativi sulle emissioni, dimostrando che un mix energetico pulito riduce il rilascio di CO<sub>2</sub>e, mentre le fonti fossili rimangono le più inquinanti. Inoltre, il nucleare emerge come fonte più veloce, pulita, sicura ed economica per il raggiungimento della decarbonizzazione.
- L'adozione di Bitcoin integrata ai consumi indica che, dove Bitcoin è presente, si può avere un effetto di ottimizzazione dei consumi e di miglior utilizzo dell'energia (ad es. sfruttando surplus di energia rinnovabile o evitando sprechi). Il mining di Bitcoin, se integrato con fonti di energia a basso impatto (specialmente idroelettrico, nucleare o rinnovabili in generale), non risulta essere un driver significativo di inquinamento. Anzi, l'adozione di pratiche di "*green mining*" incentiva un uso più efficiente delle risorse disponibili e può fungere da stabilizzatore di domanda elettrica in regioni con surplus energetico.
- Rilevante è il fattore di determinazione nel modello panel a effetti fissi, capace di cogliere il 99,9% della variabilità delle emissioni di GHG, spiegando come le variabili incluse nel modello e gli effetti fissi dei singoli Paesi risultino estremamente significative.

Dall'analisi di questo ampio dataset e delle diverse metodologie econometriche adottate, risulta che le implicazioni socioeconomiche implicano un mix energetico più sostenibile che, abbinato a tecnologie come Bitcoin, può supportare la diversificazione economica, ridurre lo spreco di energia e mitigare l'impatto delle emissioni inquinanti.

Lo studio riconosce alcuni limiti, tra cui il reperimento dei dati sui prezzi dell'energia e il fatto che il mix energetico riguardi solo l'energia elettrica prodotta e non quella totale<sup>78</sup>, ma offre un quadro coerente: se ben regolamentati e orientati verso la sostenibilità, il mining di Bitcoin e il nucleare possono convergere in un modello sinergico per la transizione energetica, riducendo le emissioni inquinanti e i consumi globali mitigando gli sprechi. Un aumento del nucleare a parità di consumi riduce sensibilmente le emissioni. Una diffusione del mining di Bitcoin ben pianificata, connessa a fonti sostenibili, non aggrava la crisi climatica e in alcuni casi può favorire un uso più efficiente e ottimizzato delle risorse energetiche. In ultima analisi, il lavoro sottolinea come la sinergia tra politiche ambientali, nucleare, rinnovabili e Bitcoin possa fornire soluzioni concrete e a impatto ambientale contenuto per fronteggiare la crescente domanda di energia e l'urgenza di mitigare i cambiamenti climatici. Questo rappresenta il filo conduttore delle conclusioni finali, che invitano a valorizzare e incentivare la transizione verso mix energetici puliti, sfruttando al contempo le potenzialità di strumenti e asset digitali come Bitcoin. Perché sì, Bitcoin consuma energia (si è visto in porzioni minime rispetto ai bilanci energetici statali e nonostante sia il 7° asset più capitalizzato al mondo), ma non inquina, anzi, mitiga l'inquinamento posizionandosi laddove vi è incentivo economico per tutti a 360° di produrre energia, venderla, mitigare le emissioni prodotte e gli sprechi, riducendo così anche i consumi.

**Criticità.** Il PIL, introdotto negli anni Trenta (circa 100 anni fa), permette di misurare il valore totale dei beni e dei servizi prodotti in un Paese. Inizialmente utilissimo per misurare la crescita economica mondiale, ma col tempo anch'esso è invecchiato. Infatti, nelle aule universitarie, si continua ad insegnare che più il PIL aumenta e meglio è per un Paese. Il problema è che il PIL non è in grado di distinguere tra attività che migliorano la qualità della vita e attività che invece possono danneggiarla. Ad esempio, un disastro naturale richiede urgentemente una ricostruzione, aumentando il PIL. In questo caso è possibile affermare che ciò rappresenti un miglioramento per la società? Le ingenti spese legate alla criminalità aumentano il PIL, i costi sanitari dovuti all'inquinamento aumentano il PIL. Nulla di tutto ciò rifletterà mai un reale miglioramento del benessere di una comunità.

---

<sup>78</sup> Si tenga presente che, in media, l'80% dell'energia prodotta da uno Stato è elettricità.

L'altro vero problema è che il PIL ignora completamente fattori come la disuguaglianza, la sostenibilità ambientale, l'istruzione, il benessere individuale e la salute mentale, concetti che negli anni Trenta erano trascurati. Inoltre, attività come il lavoro domestico, il volontariato o la cura dei figli (valore fondamentale per la società) non potranno mai essere contabilizzate nel PIL. Praticamente, siamo ossessionati da una metrica totalmente dopata che si concentra esclusivamente sulla crescita economica infinita, senza essere in grado minimamente di valutare se tale crescita sia sostenibile a lungo termine e soprattutto se stiamo perdendo risorse naturali insostituibili, o se il nostro ecosistema sta andando totalmente in crisi. Il PIL non è inutile, è addirittura controproducente. Purtroppo, tutt'oggi, non è disponibile un indicatore economico alternativo capace di catturare tutte le micro-sfaccettature di uno Stato e, nonostante i problemi appena evidenziati, è stato inserito il PIL pro-capite nell'analisi.

**La prossima bolla verde.** Vista la situazione mondiale riguardo emissioni, inquinamento e cambiamento climatico, il rischio maggiormente percepito è che si stia lentamente scivolando nell'incubo di un nuovo conflitto mondiale, quello che oppone l'uomo alla natura. Allo stesso tempo, sui mercati finanziari si consuma una strana inversione di tendenza: "la prossima bolla sarà verde"<sup>79</sup>. Nel 2004 viene coniata la sigla ESG (*Environmental Social and Governance*), indicatore che misura la sostenibilità di un investimento finanziario in termini di impatto ambientale e usata per la prima volta nel 2010. Per avere un'idea di come il panorama finanziario sia cambiato porrendo maggiore attenzione sull'emergenza ambientale, basta confrontare il *report* annuale di BlackRock<sup>80</sup> del 2010 con uno del 2022. In particolare, si cercano le parole chiave dell'economia "green" (ESG, environmental, climate, sustainability, ecc.). Nel report del 2010 le parole "green" non compaiono, solo il sostantivo "sustainability" si rivela una volta, ma non è riferito al clima. Considerando il report annuale del 2022, le parole "green" cumulate compaiono 138 volte. In 12 anni è cambiato tutto e la finanza del 2022 si è tinta di verde.

---

<sup>79</sup> Citazione detta da Michael Douglas (alias Gordon Gekko) nel film "*Wall Street*" di Oliver Stone del 1987.

<sup>80</sup> BlackRock è il più grande asset *manager* al mondo, gestendo oltre 11.000 miliardi di dollari.

All'inizio di questo decennio, BlackRock diviene sempre più green; infatti, il CEO, Larry Fink, rivendica lo spostamento del capitale verso investimenti sostenibili. Le cose stanno mutando, ma non nel senso che ci si aspetterebbe, perché il mondo sta bruciando. L'iper-progetto del cambiamento climatico ha curvato lo spazio-tempo, eppure i mercati imboccano una direzione opposta. Ormai sono lontanissimi i giorni in cui Larry Fink chiedeva ai manager di mezzo mondo di investire in modalità ESG. La tendenza è in atto da tempo: nel 2024 diverse società di investimento hanno lasciato “*Climate Action 100+*”, un network di investitori lanciato nel 2017 per mettere pressione alle aziende sul taglio delle emissioni di CO<sub>2</sub>. Dalla creazione al 2023 altre 13 società avevano lasciato il network, ad esempio, Vanguard (il secondo gestore più grande al mondo) non ha mai aderito al progetto. Alla fine del 2022, Vanguard ha abbandonato anche l'iniziativa “*Net Zero Asset Managers*”, ossia l'organizzazione internazionale nata sulla scia della Cop26 di Glasgow, che riunisce i principali protagonisti nel mercato dell'*asset management* attivi nel contenimento della crisi climatica. Le ragioni di queste defezioni sono da ricercare nel mutare del quadro politico, con il ritorno di Trump e nella pressione esercitata da pezzi del partito repubblicano per condizionare gli aderenti ai network che puntano alla riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>. Alle questioni politiche si aggiungono anche quelle giudiziarie, che negli Stati Uniti sono spesso intrecciate: nel 2024, nel New Hampshire, i repubblicani hanno presentato una proposta di legge per vietare ai fondi pensione dello Stato di procedere con investimenti ispirati alla sostenibilità. Anche a causa di ciò, nel terzo trimestre del 2024, la raccolta netta di capitali per i fondi e per gli ETF sostenibili è stata di circa 1 miliardo di dollari, contro i 160 dell'ultimo trimestre del 2021, registrando anche il netto calo nel lancio di nuovi prodotti finanziari ESG: 57 contro gli oltre 300 di fine 2021. I dati sono allarmanti, certificando una secca inversione di tendenza. La finanza sostenibile è in crisi; infatti, a febbraio 2025 anche Larry Fink ha dovuto arrendersi e annunciare che BlackRock lascerà la “*Net Zero Asset Managers*” a causa del *pressing* dei repubblicani contro le politiche definite “*woke*”. BlackRock non utilizzerà più l'etichetta ESG perché divenuta troppo “politicizzata”. Viviamo un'età di mezzo, carica di possibilità. La crisi della finanza sostenibile può essere anche considerata come il superamento di quel gioco di inganni e illusioni chiamato “*Green washing*”.

Siamo in un'epoca in cui tutto può ancora succedere, a condizione di ascoltare le ragioni di un'ecologia profonda, perché la sfida che abbiamo davanti riguarda l'abbattimento delle emissioni nell'atmosfera e la necessità urgente di una tecnologia davvero attenta e incline all'emergenza climatica. Questo problema riguarda noi e riguarda le nostre città che sono le principali cause di inquinamento, riguarda soprattutto l'aria che respiriamo e le risorse del pianeta, riguarda “la vita da trasmettere a chi verrà dopo”<sup>81</sup>.

**Riflessioni finali.** Le considerazioni sviluppate nel corso di questo lavoro mostrano come le sfide energetiche e ambientali, dalla gestione delle emissioni di gas serra fino alla ricerca di nuovi orizzonti finanziari realmente orientati alla sostenibilità, siano parte di un medesimo percorso di transizione, culturale e sistemico. È in questo contesto che appare cruciale, da un lato, il potenziamento di tecnologie pulite (in particolare il nucleare e le fonti rinnovabili) e, dall'altro, la possibilità di sfruttare al meglio tutte le opportunità tecniche ed economiche emergenti (come il mining di Bitcoin), purché regolate in un'ottica di responsabilità ambientale e di inclusione sociale. Occorre, dunque, immaginare strategie capaci di assicurare uno sviluppo equilibrato e resiliente, in grado di tutelare le risorse del pianeta e di sostenere la crescita economica senza alimentare disparità. A conclusione di questo percorso di analisi, è utile e doveroso ricordare che ogni fase di transizione richiede strumenti adeguati, tanto a livello normativo quanto sul piano culturale. Oltre alla tecnologia e alla finanza, è necessaria una visione olistica che riconsideri nel suo complesso i parametri di valutazione dell'economia, superando indicatori divenuti obsoleti e introducendo metriche che misurino davvero il benessere collettivo, la conservazione dell'ecosistema e la qualità della vita. Solo così è possibile costruire nuovi paradigmi che superino vecchie logiche di sfruttamento intensivo, puntando a forme di investimento più etiche e trasparenti, realmente in grado di fronteggiare l'emergenza climatica.

---

<sup>81</sup> Citazione proveniente dalla poesia “Dopo” (2005) di Erri De Luca, disponibile interamente a <https://labottegadellestorie.org/dopo/>.

Infine, può essere significativo ribadire una convinzione che dà senso a ogni sforzo di cambiamento, anche in prospettiva futura, richiamando la necessità di un impegno condiviso verso l'innovazione e la creatività, esortando ciascuno, nel proprio ruolo, a riprogettare il modo stesso di concepire la produzione e il benessere. L'auspicio è che la sinergia tra conoscenza scientifica, responsabilità sociale e volontà politica dia vita a una nuova fase di sviluppo che accolga l'urgenza ecologica come una sfida irrinunciabile, da affrontare con lucidità, equilibrio e coraggio, al fine di tracciare nuove linee sulla mappa del futuro: perché "l'economia non solo può essere cambiata, ma va cambiata. Lo strumento più potente in economia non è il denaro o l'algebra, ma una matita, perché solo con una semplice matita si può ridisegnare il mondo. Vi sfido a provarci"<sup>82</sup>.

---

<sup>82</sup> Citazione del Professore Gian Luca Comandini nel podcast "*Out of the box*" di Chora News.



## Bibliografia

---

- a) Libri cartacei direttamente consultati per la stesura della seguente tesi:
- [1] A. M. Antonopoulos (autore) & R. Masutti (traduttore), *“Mastering Bitcoin”* (2019).
  - [2] D. Coen & G. Zucco, *“Domande & risposte su Bitcoin: Dal concetto di blockchain alla definizione della suite LNP/BP”* (2019).
  - [3] V. Dalla Costa, *“Villaggio Bitcoin – L'alba di una nuova società basta su una moneta sana e onesta”* (2022).
  - [4] R. G. Frega (alias Rikki), *“Missione El Salvador – Avventura, Natura e Bitcoin”* (2023), La Memoria del Mondo Libreria Editrice.
  - [5] A. Moccia, Geopop, *“Cercasi Energia – La soluzione per il futuro è un ventaglio di soluzioni”* (2022), Cairo.
  - [6] S. Nakamoto, *“Bitcoin: un sistema di moneta elettronica peer-to-peer”* (2024), Bitbox. Whitepaper di Bitcoin analizzato a cura di Bitbox; sito disponibile a: <https://bitbox.swiss/>.
  - [7] A. Patel (autore) & V. Darcy & L. Berto (alias Guybrush) (traduttori), *“Il Vademecum Bitcoin – Concetti Fondamentali di Economia, Tecnologia e Psicologia”* (2023), Konsensus Network.
  - [8] L. Romano, *“L'avvocato dell'atomo – In difesa dell'energia nucleare”* (2022), Fazi Editore.
  - [9] J. H. Stock & M. W. Watson, F. Peracchi, *“Introduzione all'econometria”* (2020), 5<sup>a</sup> edizione, Pearson Italia SPA.
  - [10] U. Tarantino & G. Zucco, *“Protocollo Bitcoin: Fondamenti per capire la tecnologia delle criptovalute e le sue applicazioni”* (2021).
- b) Paper scientifici pubblicati in journal validi, ricercati, analizzati e reperibili su Google Scholar:
- [11] M. Abedin, Md. W. Rahman & Md. S. Chowdhury, *“Efficiency analysis of nuclear power plants: A comprehensive review”* (2023), Consensus; disponibile a: <https://consensus.app/papers/efficiency-analysis-power-plants-review-abedin/ce1ccbeaad3566e9e658ee266d0e11f/>.
  - [12] J.-M. Burniaux, J. Chateau, R. Dellink & R. A. Duval, *“The Economics of Climate Change Mitigation: How to Build the Necessary Global Action in a Cost-Effective Manner”* (2009), ResearchGate (OECD – Organization for Economic Co-operation and Development); disponibile a: [https://www.researchgate.net/publication/46456942\\_The\\_Economics\\_of\\_Climate\\_Change\\_Mitigation\\_How\\_to\\_Build\\_the\\_Necessary\\_Global\\_Action\\_in\\_a\\_Cost-Effective\\_Manner](https://www.researchgate.net/publication/46456942_The_Economics_of_Climate_Change_Mitigation_How_to_Build_the_Necessary_Global_Action_in_a_Cost-Effective_Manner).
  - [13] E. M. Cerutti, J. Chen & M. Hengge, *“A Primer on Bitcoin Cross-Border Flows: Measurement and Drivers”* (2024), IMF Working Papers (International Monetary Fund); disponibile a: <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2024/04/05/A-Primer-on-Bitcoin-Cross-Border-Flows-Measurement-and-Drivers-547429>.
  - [14] N. Chen, Y. Chen & H. Zhao, *“Heat Recovery from Cryptocurrency Mining by Liquid Cooling Technology”* (2022), ResearchGate; disponibile a: [https://www.researchgate.net/publication/363785606\\_Heat\\_Recovery\\_from\\_Cryptocurrency\\_Mining\\_by\\_Liquid\\_Cooling\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/363785606_Heat_Recovery_from_Cryptocurrency_Mining_by_Liquid_Cooling_Technology).
  - [15] E. Di Febo, A. Ortolano, M. Foglia, M. Leone & E. Angelini, *“From Bitcoin to carbon allowances: An asymmetric extreme risk spillover”* (2021), Consensus; disponibile a: <https://consensus.app/papers/from-bitcoin-carbon-allowances-extreme-risk-spillover-febo/ad7f93ad63c75912b853ecf8be4e7a9a/>.
  - [16] J. I. Ibanez & A. Freier, *“Bitcoin's Carbon Footprint Revisited: Proof of Work Mining for Renewable Energy Expansion”* (2023), arxiv (Cornell University); disponibile a: <https://arxiv.org/abs/2304.04578>.
  - [17] S. Jiang, Y. Li, Q. Lu & Y. Hong, *“Policy Assessments for the Carbon Emission Flows and Sustainability of Bitcoin Blockchain Operation in China”* (2020), ResearchGate; disponibile a: [https://www.researchgate.net/publication/345184652\\_Policy\\_Assessments\\_for\\_the\\_Carbon\\_Emission\\_Flows\\_and\\_Sustainability\\_of\\_Bitcoin\\_Blockchain\\_Operation\\_in\\_China](https://www.researchgate.net/publication/345184652_Policy_Assessments_for_the_Carbon_Emission_Flows_and_Sustainability_of_Bitcoin_Blockchain_Operation_in_China).

- [18] A. Lamba, “*Are carbon offsets the key to green cryptocurrencies?*” (2022), Consensus; disponibile a: <https://consensus.app/papers/carbon-offsets-cryptocurrencies-lamba/2082d318695f50c89e5e33460c9ff5e8/>.
- [19] J. O'Hare, A. Fairchild & U. Ali, “*Money & Trust in Digital Society – Bitcoin, Nostr, Stablecoins, Digital Object and Machine Learning in B2B Telepresent Mixed Reality*” (2023), ResearchGate; disponibile a: [https://www.researchgate.net/publication/362152519\\_Money\\_Trust\\_in\\_Digital\\_Society\\_-\\_Bitcoin\\_Nostr\\_Stablecoins\\_Digital\\_Objects\\_and\\_Machine\\_Learning\\_in\\_B2B\\_Telepresent\\_Mixed\\_Reality](https://www.researchgate.net/publication/362152519_Money_Trust_in_Digital_Society_-_Bitcoin_Nostr_Stablecoins_Digital_Objects_and_Machine_Learning_in_B2B_Telepresent_Mixed_Reality).
- [20] H. F. C. Pardo, T. Mancini & J. Olmo, “*Machine Learning the Carbon Footprint of Bitcoin Mining*” (2022), ResearchGate; disponibile a: [https://www.researchgate.net/publication/358408503\\_Machine\\_Learning\\_the\\_Carbon\\_Footprint\\_of\\_Bitcoin\\_Mining](https://www.researchgate.net/publication/358408503_Machine_Learning_the_Carbon_Footprint_of_Bitcoin_Mining).
- [21] J. M. Pearce, “*Limitations of Nuclear Power as a Sustainable Energy Source*” (2012), Consensus; disponibile a: <https://consensus.app/papers/limitations-nuclear-power-sustainable-energy-source-pearce/0deaf86b8fe05fc6afb4ef86da3a69dd/>.
- [22] V. Pershukov, V. Artisyuk & Kashirsky, “*Paving the Way to Green Status for Nuclear Power*” (2022), Consensus; disponibile a: <https://consensus.app/papers/paving-status-nuclear-power-pershukov/b25ef005994c5df786355095e76af997/>.
- [23] J. A. M. Porto, L. de J. Alves, F. C. Nunes & E. Gross, “*Nuclear energy and its role in decarbonization: Scenarios and perspectives*” (2024), ResearchGate; disponibile a: [https://www.researchgate.net/publication/378837030\\_Nuclear\\_energy\\_and\\_its\\_role\\_in\\_decarbonization\\_Scenarios\\_and\\_perspectives#page=132](https://www.researchgate.net/publication/378837030_Nuclear_energy_and_its_role_in_decarbonization_Scenarios_and_perspectives#page=132).
- [24] M. Saqlain, V. Simic & D. Pamucar, “*Evaluation of Carbon Footprints Associated with Cryptocurrency Mining using q-Rung Orthopair Fuzzy Hypersoft Sets*” (2024), ResearchGate; disponibile a: [https://www.researchgate.net/publication/384411082\\_Evaluation\\_of\\_Carbon\\_Footprints\\_Associated\\_with\\_Cryptocurrency\\_Mining\\_using\\_q-Rung\\_Orthopair\\_Fuzzy\\_Hypersoft\\_Sets](https://www.researchgate.net/publication/384411082_Evaluation_of_Carbon_Footprints_Associated_with_Cryptocurrency_Mining_using_q-Rung_Orthopair_Fuzzy_Hypersoft_Sets).
- [25] J. Sedlmeir, H. U. Buhl, G. Fridgen & R. Keller, “*The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth*” (2020), ResearchGate; disponibile a: [https://www.researchgate.net/publication/342313238\\_The\\_Energy\\_Consumption\\_of\\_Blockchain\\_Technology\\_Beyond\\_Myth](https://www.researchgate.net/publication/342313238_The_Energy_Consumption_of_Blockchain_Technology_Beyond_Myth).
- [26] C. Stoll, L. Klaaben, U. Gallersdorfer & A. Neumuller, “*Climate Impacts of Bitcoin Mining in the U.S.*” (2023), CEEPR (MIT – Centre for Energy and Environmental Policy Research); disponibile a: <https://ceepr.mit.edu/wp-content/uploads/2023/06/MIT-CEEPR-WP-2023-11.pdf>.
- [27] W. Sun, H. Jin, F. Jin, L. Kong, Y. Peng & Z. Dai, “*Spatial analysis of global Bitcoin mining*” (2022), scientific reports (Nature); disponibile a: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-14987-0.pdf>.
- [28] M. Terasenko, K. Kozak & L. Omeiza, “*Energy efficiency and environmental friendliness of nuclear power plants and wind power plants*” (2023), Consensus; disponibile a: <https://consensus.app/papers/energy-efficiency-friendliness-power-plants-wind-power-terasenko/d266bef7f39455078c666777efd6ed41/>.
- [29] H. P. Winotoatmojo, S. Y. Lazuardy, F. Arland & A. A. Setyawan, “*Environmental Impact of Cryptocurrency Mining: Sustainability Challenges and Solution*” (2024), ResearchGate; disponibile a: [https://www.researchgate.net/publication/378883173\\_ENVIRONMENTAL\\_IMPACT\\_OF\\_CRYPTOCURRENCY\\_MINING\\_SUSTAINABILITY\\_CHALLENGES\\_AND\\_SOLUTIONS](https://www.researchgate.net/publication/378883173_ENVIRONMENTAL_IMPACT_OF_CRYPTOCURRENCY_MINING_SUSTAINABILITY_CHALLENGES_AND_SOLUTIONS).
- [30] B. Xie, “*Environmental Consequences of Mining Bitcoin: The Carbon Emission in China*” (2022), ResearchGate; disponibile a: [https://www.researchgate.net/publication/367540758\\_Environmental\\_Consequences\\_of\\_Mining\\_Bitcoin\\_The\\_Carbon\\_Emission\\_in\\_China](https://www.researchgate.net/publication/367540758_Environmental_Consequences_of_Mining_Bitcoin_The_Carbon_Emission_in_China).
- [31] S. Yuksel, H. Dincer, C. Caglayan, G. S. Uluer & A. Lisin, “*Bitcoin Mining with Nuclear Energy*” (2022), emerald insight (Discover Journals, Books & Case Studies); disponibile a: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/978-1-80117-898-320221019/full/html>.

- [32] L. Zhan, Y. Bo, T. Lin & A. Fan, “*Development and outlook of advanced nuclear energy technology*” (2021), Consensus; disponibile a: <https://consensus.app/papers/development-outlook-advanced-energy-technology-zhan/701e79b256585c1f90b5d37e9fc91bf0/>.

## Sitografia

---

- a) Fonti maggiormente consultate per la stesura della seguente tesi:
- [1] L. Boiardi, “*The Crypto Gateway*” (2024); sito disponibile a: <https://thecryptogateway.it/>.
  - [2] G. M. Brera & G. L. Comandini “*Black Box*” & “*Out of the box*” (2024), podcast di “*Chora News*”, prodotto da “*Chora Media*”; sito disponibile a: <https://choramedia.com/podcast/black-box/>.
  - [3] M. Costanza; sito disponibile a: <https://marcocostanza.it/>.
  - [4] R. G. Frega (alias Rikki) & L. Berto (alias Guybrush), “*Bitcoin Italia Podcast*” (2024); sito disponibile a: <https://bitcoinitaliapodcast.it/>.
  - [5] R. G. Frega (alias Rikki) & L. Berto (alias Guybrush), Lugano PlanB Forum 2022, YouTube; disponibile a: <https://www.youtube.com/watch?v=Jin5RjUbXrQ&t=7s>.
  - [6] R. G. Frega (alias Rikki) & L. Nori, “*Bitcoin Explorers*” (2024), YouTube; disponibile a: <https://www.youtube.com/@bitcoinexplorers>.
  - [7] V. Lops, “*Crypto*” (2024), podcast de “*Il Sole 24 Ore*”; disponibile a: <https://podcast.ilsole24ore.com/serie/cripto-AEC88W9B>.
  - [8] A. Moccia, A. Beloli, M. Bosco, R. De Marco, S. Gandelli & altri, “*Geopop*” (2024); sito disponibile a: <https://www.geopop.it/>.
  - [9] S. Nakamoto, “*Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*” (2008); disponibile a: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (inglese), [https://bitcoin.org/files/bitcoin-paper/bitcoin\\_it.pdf](https://bitcoin.org/files/bitcoin-paper/bitcoin_it.pdf) (italiano).
  - [10] L. Romano, F. Buzzi, L. Munteanu & altri, “*L’avvocato dell’Atomo*” (2024), sito disponibile a: <https://www.avvocatoatomico.com/>, le cui principali fonti proposte (e consultate per la stesura del seguente lavoro) sono:
    - IEA (International Energy Agency); sito disponibile a: <https://www.iea.org/>.
    - IAEA (International Atomic Energy Agency); sito disponibile a: <https://www.iaea.org/>.
    - IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change); sito disponibile a: <https://www.ipcc.ch/>.
    - UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation); sito disponibile a: <https://www.unscear.org/>.
    - JRC (Joint research Center); sito disponibile a: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/index\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/index_en).
    - UNECE (United Nations Economic Commission for Europe); sito disponibile a: <https://unece.org/>.
    - IRENA (International Renewable Energy Agency); sito disponibile a: <https://www.irena.org/>.
    - UNEP (United Nations Environment Programme); sito disponibile a: <https://www.unep.org/topics/energy>.
  - [11] F. Rivi, “*Bitcoin Train*” (2024); sito disponibile a: <https://www.bitcointrain.it/>.
  - [12] F. Rivi, prod. Mediapason & S. Franchi, “*Esploriamo Bitcoin*” (2024), episodio 03, YouTube; disponibile a: <https://www.youtube.com/watch?v=mYDv4HPb5Wg>.
  - [13] F. Rivi, Atlas21, sito disponibile a: <https://atlas21.com/it/>.
  - [14] F. Rivi, “*Bitcoin consumerà quanto il mondo intero*” (2024), Brescia BitCare Forum 2024, YouTube; disponibile a: [https://www.youtube.com/watch?v=d9\\_qLfagTj4&list=PLQqRmXu-kJhwGGs-j2CNx8SrgeYxenzv9&index=8](https://www.youtube.com/watch?v=d9_qLfagTj4&list=PLQqRmXu-kJhwGGs-j2CNx8SrgeYxenzv9&index=8).
  - [15] D. F. Sada, G. Valentini & M. Piccaluga, “*Il Bazar Atomico*” (2024); sito disponibile a: <https://ilbazaratomico.com/>.
  - [16] Young Platform, “*DYOR24*” (2024), intervento di M. Costanza; sito disponibile a: <https://youngplatform.com/>.

- b) The Cambridge Centre for Alternative Finance (CCAF) & CBECI; siti disponibili a: <https://ccaf.io/> e <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci>, presso Università di Cambridge: <https://www.cam.ac.uk/>.
- c) Variabili, link dei database consultati, utilizzati per costruire il dataset usato:
- ghg: <https://ourworldindata.org/grapher/ghg-emissions-by-world-region>.
  - nuclear: <https://ourworldindata.org/grapher/share-electricity-nuclear>.
  - renewables: <https://ourworldindata.org/grapher/share-electricity-renewables>.
  - fossil: <https://ourworldindata.org/grapher/share-electricity-fossil-fuels>.
  - consum: <https://ourworldindata.org/grapher/primary-energy-cons>.
  - gdp\_percapita: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.PP.CD?view=chart>.
  - pop: <https://ourworldindata.org/grapher/population-regions-with-projections>.
  - d\_bitcoin: variabile costruita internamente, ottenuta mediante la combinazione di varie fonti: <https://trends.google.it/trends/explore?date=all&geo=IT&q=bitcoin&hl=it>, <https://www.chainalysis.com/blog/2024-global-crypto-adoption-index/>, <https://www.ssrn.com/index.cfm/en/>, <https://www.statista.com/statistics/1202503/global-cryptocurrency-user-base/>, <https://arxiv.org/>, <https://adoption.atlas21.com/globe> e [https://ccaf.io/cbnsi/cbeci/mining\\_map](https://ccaf.io/cbnsi/cbeci/mining_map).
  - d\_policy: variabile costruita internamente, ottenuta mediante la combinazione di varie fonti: <https://unfccc.int/non-annex-I-NCs>, <https://emissioni.sina.isprambiente.it/inventario-nazionale/>, <https://climate-laws.org/>, <https://www.eea.europa.eu/it> e <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/inventario-nazionale-delle-emissioni-in-atmosfera-1990-2021-informative-inventory-report-2023>.
- d) Articoli, documenti, paper, ricerche ed analisi scientifiche consultate:
- [17] <https://www.jbs.cam.ac.uk/2023/bitcoin-electricity-consumption/>.
  - [18] <https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy?ref=ghost.tate.energy>.
  - [19] <https://geodacenter.github.io/download.html>.
  - [20] <https://indicatoriambientali.isprambiente.it/it/energia/emissioni-di-gas-serra-complessive-e-da-processi-energetici>.
  - [21] <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/il-metano-nell2019inventario-nazionale-delle-emissioni-di-gas-serra-l2019italia-e-il-global-methane-pledge>.
  - [22] <https://ipccitalia.cmcc.it/climate-change-2021-il-rapporto-spiegato-dagli-scientziati-italiani/>.
  - [23] <https://www.eai.enea.it/nuovo-nucleare-ricerca-tecnologie-scenari-e-prospettive/nuovo-nucleare-interviste/il-nuovo-nucleare-e-necessario-per-la-transizione-ecologica.html>.
  - [24] <https://ibicocca.unimib.it/perche-lenergia-nucleare-e-una-risorsa-per-un-futuro-sostenibile/>.
  - [25] <https://www.eai.enea.it/nuovo-nucleare-ricerca-tecnologie-scenari-e-prospettive/nucleare-sostenibile-scenari-e-prospettive.html>.
  - [26] <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/il-metano-nell2019inventario-nazionale-delle-emissioni-di-gas-serra-l2019italia-e-il-global-methane-pledge>.
  - [27] <https://www.iaea.org/sites/default/files/21/10/nuclear-energy-for-a-net-zero-world.pdf>.
  - [28] [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/Chapter-9-Renewable-Energy-in-the-Context of Sustainable-Development-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/Chapter-9-Renewable-Energy-in-the-Context-of-Sustainable-Development-1.pdf).
  - [29] <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/nuclear-energy-and-sustainable-development>.
  - [30] <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1754web-26894285.pdf>.
  - [31] <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>.
  - [32] <https://www.iaea.org/newscenter/statements/nuclear-energy-and-sustainable-development>.
  - [33] [https://www.oecd.org/en/publications/projected-costs-of-generating-electricity\\_20798393.html](https://www.oecd.org/en/publications/projected-costs-of-generating-electricity_20798393.html).
  - [34] <https://unu.edu/press-release/un-study-reveals-hidden-environmental-impacts-bitcoin-carbon-not-only-harmful-product>.
  - [35] <https://cordis.europa.eu/article/id/445174-taking-the-radioactive-out-of-nuclear-waste/it>.
  - [36] <https://energy.mit.edu/futureenergysystemscenter/events/2024-future-energy-systems-center-fall-workshop/>.
  - [37] <https://www.weforum.org/publications/a-collaborative-framework-for-accelerating-advanced-nuclear-and-small-modular-reactor-deployment/>.

- [38] <https://energy.mit.edu/2024-nuclear-fission-forum/>.
- [39] <https://energy.mit.edu/futureenergysystemscenter/events/2024-future-energy-systems-center-spring-workshop/>.
- [40] <https://energy.mit.edu/energy-futures/winter-2024/>.
- [41] <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2024/01/MITEI-Energy-Futures-Winter-2024.pdf>.
- [42] <https://energy.mit.edu/annual-report/2024/>.
- [43] <https://unu.edu/press-release/un-study-reveals-hidden-environmental-impacts-bitcoin-carbon-not-only-harmful-product>.
- [44] <https://unric.org/it/omm-record-2024-di-emissioni-di-carbonio-da-combustibili-fossili/>.
- [45] <https://assets.bbhuh.io/professional/sites/24/Energy-Transition-Investment-Trends-2024.pdf>.
- [46] <https://www.unep.org/news-and-stories/speech/closing-energy-access-gap-and-transitioning-decarbonized-energy-systems>.
- [47] <https://unric.org/it/le-concentrazioni-di-gas-serra-raggiungono-un-livello-record-ancora-una-volta-rapporto-dellorganizzazione-meteorologica-mondiale/>.
- [48] <https://ilbolive.unipd.it/it/news/emissioni-metano-atmosfera-chi-produce-come>.
- [49] [https://www.edfeurope.org/sites/default/files/2022-09/methane-factsheet-2022\\_IT.pdf](https://www.edfeurope.org/sites/default/files/2022-09/methane-factsheet-2022_IT.pdf).
- [50] <https://asvis.it/approfondimenti/22-10974/ma-il-nucleare-e-sostenibile-cosa-emerge-dai-rapporti-scientifici-dellue>.
- [51] <https://theconversation.com/can-cryptocurrencies-ever-be-green-238359>.
- [52] [https://justclimate.fes.de/fileadmin/user\\_upload/Nuclear\\_Series/Nuclear\\_Energy\\_the\\_Pro\\_s\\_and\\_Cons\\_-\\_FES\\_Just\\_Climate.pdf](https://justclimate.fes.de/fileadmin/user_upload/Nuclear_Series/Nuclear_Energy_the_Pro_s_and_Cons_-_FES_Just_Climate.pdf).
- [53] <https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy#:~:text=Summary,are%20vastly%20safer%20and%20cleaner>.
- [54] <https://news.cornell.edu/stories/2023/11/bitcoin-could-support-renewable-energy-development>.
- [55] <https://pubs.naruc.org/pub/8540FD00-1866-DAAC-99FB-03AA53516220>.
- [56] <https://www.sogin.it/it/chiusuradelciclonucleare/gestione-dei-rifiuti.html>.
- [57] <https://www.mase.gov.it/energia/sostenibilita/energia-nucleare/rifiuti-radioattivi-e-combustibile-nucleare-esaurito/normativa-di-riferimento>.
- [58] <https://eur-lex.europa.eu/IT/legal-content/summary/convention-on-nuclear-safety.html>.
- [59] [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity\\_price\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics).
- [60] <https://world-nuclear.org/>.
- [61] <https://www.irena.org/News/pressreleases/2024/Mar/Record-Growth-in-Renewables-but-Progress-Needs-to-be-Equitable-IT>.
- [62] <https://world-nuclear.org/news-and-media/association-news/world-nuclear-association-attends-world-economic-forum-senior-executive-meeting-to-accelerate-nuclear-energy-deployment>.
- [63] <https://www.weforum.org/stories/2024/11/meeting-global-climate-goals-requires-a-step-change-in-nuclear-investment/>.
- [64] <https://www.weforum.org/stories/2024/11/accelerating-new-nuclear-and-small-modular-reactor-deployment/>.
- [65] <https://www.weforum.org/stories/2024/02/renewables-energy-capacity-demand-growth/>.
- [66] <https://www.weforum.org/videos/could-nuclear-power-help-the-transition-to-renewable-energy/>.
- [67] <https://www.weforum.org/videos/renewable-energy-2023/>.
- [68] <https://climate.mit.edu/posts/climate-impacts-bitcoin-mining-us>.
- e) Altri link consultati (notizie, news, approfondimenti, ecc.):
- [69] <https://bitcointalk.org/index.php>.
- [70] <https://batcoinz.com/accurately-dynamically-calculating-bitcoin-network-emissions/>.
- [71] [https://en.wikipedia.org/wiki/Environmental\\_impact\\_of\\_bitcoin](https://en.wikipedia.org/wiki/Environmental_impact_of_bitcoin).
- [72] <https://batcoinz.com/bitcoin-by-energy-source/>.
- [73] <https://cryptonews.com/it/news/gli-esperti-dicono-che-bitcoin-aiutera-a-risolvere-i-problemi-climatici/>.
- [74] <https://cryptonomist.ch/2024/04/26/mining-bitcoin-consumo-energia-banche/>.



- [75] <https://bitcoinmagazine.com/technical/the-joule-paradox-energy-sets-the-value-of-bitcoin-and-bitcoin-sets-the-value-of-energy>.
- [76] <https://nucleareeragione.org/il-nucleare-a-confronto-con-altre-forme-di-energia/>.
- [77] <https://www.binance.com/it/square/post/2024-11-03-bitcoin-mining-bans-may-increase-global-carbon-emissions-15729674572018>.
- [78] <https://it.cointelegraph.com/news/sustainable-bitcoin-mining-power-mix-hits-59-5-btc-mining-council>.
- [79] <https://www.techopedia.com/it/statistiche-sul-mining-di-bitcoin-e-sull-energia-consumata>.
- [80] <https://www.terawulf.com/nautilus-cryptomine/>.
- [81] <https://finance.yahoo.com/news/bitcoin-miner-terawulf-sells-stake-130952489.html>.
- [82] <https://www.reuters.com/business/energy/talen-energy-buys-stake-nuclear-powered-bitcoin-mining-campus-2024-10-03/>.
- [83] <https://www.gocompare.com/gas-and-electricity/what-powers-the-world/>.
- [84] <https://it.euronews.com/2020/10/20/francia-tra-nucleare-e-fonti-rinnovabili-quali-sono-i-vantaggi-e-i-rischi-della-transizion>.
- [85] [https://www.ansa.it/ansa2030/notizie/energia\\_energie/2023/11/21/italia-al-60-posto-in-europa-per-costo-dellelettricit%C3%A0-70540382-b006-4552-b1ab-0723f806eddb.html](https://www.ansa.it/ansa2030/notizie/energia_energie/2023/11/21/italia-al-60-posto-in-europa-per-costo-dellelettricit%C3%A0-70540382-b006-4552-b1ab-0723f806eddb.html).
- [86] <https://equilibrimagazine.it/clima/2024/10/01/emissioni-di-co2-e-distribuzione-del-reddito/>.
- [87] <https://news.bitcoin.com/it/india-nigeria-indonesia-guidano-indice-di-adozione-delle-criptovalute-chainalysis-2024/>.
- [88] <https://www.tpi.it/economia/ladozione-delle-criptovalute-nei-paesi-in-via-di-sviluppo-il-futuro-e-qui-202403251091853/>.
- [89] <https://news.bit2me.com/it/Paesi-che-guidano-la-crescita-di-nuovi-utenti-bitcoin>.
- [90] <https://it.cointelegraph.com/news/global-bitcoin-adoption-to-hit-10-by-2030-blockware-report>.
- [91] <https://www.money.it/Criptoalute-chi-le-sta-usando-di-piu-nel-mondo-la-mappa>.
- [92] <https://www.focus.it/ambiente/ecologia/inquinamento-da-metano-le-vere-cifre>.
- [93] <https://aroundbitcoin.io/blog/bitcoin-paesi-in-via-di-sviluppo-opportunita-sfide/>.
- [94] <https://it.cointelegraph.com/news/bitcoin-mining-becomes-more-sustainable-mining-council-s-q4-survey>.
- [95] <https://it.cointelegraph.com/news/bitcoin-mining-becoming-more-environmentally-friendly>.
- [96] <https://associazioneitaliananucleare.it/lenergia-nucleare-a-supporto-della-decarbonizzazione/>.
- [97] <https://ilgiornaledellambiente.it/ue-il-nucleare-e-energia-verde-e-sostenibile/>.
- [98] <https://quifinanza.it/green/bitcoin-mining-impatto-ambientale/640370/>.
- [99] <https://thecryptogateway.it/mica-approvata-la-regolamentazione-bitcoin-crypto-e-nft-in-europa/>.
- [100] <https://www.consilium.europa.eu/it/press/press-releases/2022/06/30/digital-finance-agreement-reached-on-european-crypto-assets-regulation-mica/pdf>.
- [101] <https://apnews.com/article/crypto-bitcoin-greenidge-climate-fb72c71b5b19bbf8261e99c03edfe28b>.
- [102] <https://www.theverge.com/2024/11/22/24302303/crypto-mining-climate-change-levy-tax-bitcoin>.
- [103] <https://www.texastribune.org/2024/01/03/texas-bitcoin-profit-electricity/>.
- [104] <https://thecryptogateway.it/bitcoin-sostenibilita-ambiente/>.
- [105] [https://en.bitcoin.it/wiki/Genesis\\_block](https://en.bitcoin.it/wiki/Genesis_block).
- [106] <https://news.bit2me.com/it/etiopia-convierte-energia-hidroelectrica-en-oro-digital-con-bitcoin>.
- [107] <https://www.borsaitaliana.it/borsa/glossario/crypto-asset.html?~:text=Glossario%20finanziario%20%2D%20Crypto%2Dasset&text=Una%20caratteristica%20distintiva%20%20C3%A8%20la,del%202019%20dei%20crypto%2Dasset>.
- [108] <https://www.econopoly.ilsole24ore.com/2024/04/12/donne-banche-servizi-finanziari-inclusione/?~:text=Secondo%20l'ultimo%20report%20della,di%20accesso%20ai%20servizi%20finanziari>.

- [109] [https://it.wikipedia.org/wiki/Smantellamento\\_degli\\_impianti\\_nucleari](https://it.wikipedia.org/wiki/Smantellamento_degli_impianti_nucleari).
- [110] [https://it.wikipedia.org/wiki/Agenzia\\_internazionale\\_per\\_l'energia\\_atomica](https://it.wikipedia.org/wiki/Agenzia_internazionale_per_l'energia_atomica).
- [111] <https://www.museoscienza.org/it/fatti-per-capire/acque-di-scarto-di-Fukushima>.
- [112] <https://cryptonomist.ch/2024/09/24/cina-dominio-mining-bitcoin-rete-ban-crypto/>.
- [113] <https://www.terawulf.com/what-is-sustainable-crypto-mining/>.
- [114] <https://www.theverge.com/24112638/cryptocurrency-bitcoin-mining-renewable-energy-hydrogen-study>.
- [115] <https://forkast.news/bitcoin-minings-green-mile-54-5-sustainable-energy-use/>.
- [116] <https://www.forbes.com/sites/digital-assets/2023/09/21/why-bitcoin-mining-might-actually-be-great-for-sustainability/>.
- [117] <https://medium.com/energy-web-insights/bitcoin-green-mining-and-the-possibility-for-a-more-sustainable-future-603f3028ed89>.
- [118] <https://prismecs.com/blog/the-global-trend-of-green-bitcoin-mining-crypto-is-becoming-sustainable>.
- [119] <https://grc.studentorg.berkeley.edu/the-sustainability-of-bitcoin-and-its-impact-on-the-environment/#:~:text=Thus%2C%20Bitcoin%20is%20responsible%20for,two%20degrees%20by%20its%20carbon>.
- [120] <https://www.u2y.io/en/blog/blockchain-significato-e-legame-sostenibilita>.
- [121] <https://www.pwc.com/us/en/services/digital-assets/blockchain-environmental-impact.html>.
- [122] <https://www.computerscience.org/resources/blockchain-and-sustainability/>.
- [123] <https://www.cointribune.com/en/bitcoin-goes-nuclear-a-new-era-for-mining/>.
- [124] <https://crypto4innovation.org/how-is-renewable-energy-stabilizing-the-grid-for-bitcoin-mining/>.
- [125] <https://www.forbes.com/sites/beccabratcher/2024/09/03/the-new-power-couple-renewable-energy-and-bitcoin-mining/>.
- [126] <https://www.forbes.com/sites/digital-assets/2024/04/18/bitcoin-spurs-major-renewable-projects-from-ocean-thermal-to-hydro/>.
- [127] <https://www.theverge.com/24112638/cryptocurrency-bitcoin-mining-renewable-energy-hydrogen-study>.
- [128] <https://forkast.news/bitcoin-minings-green-mile-54-5-sustainable-energy-use/>.
- [129] <https://www.anthropocenemagazine.org/2023/12/wind-and-solar-projects-struggle-financially-in-their-early-phases-could-bitcoin-mining-change-that/>.
- [130] <https://www.ewg.org/news-insights/news-release/2023/02/bitcoin-miner-greenwashing-claims-nuclear-powered-crypto>.
- [131] <https://www.coindesk.com/policy/2021/10/13/why-crypto-mining-needs-nuclear-power>.
- [132] <https://bitcoinmagazine.com/business/nuclear-powered-bitcoin-mining>.
- [133] <https://theminermag.com/news/2024-11-25/ercot-bitcoin-mine-texas-power/>.
- [134] <https://www.scottmadden.com/insight/nuclear-power-and-cryptocurrency-mining/>.
- [135] <https://www.scottmadden.com/insight/mining-bitcoin-with-nuclear-power/>.
- [136] <https://www.terawulf.com/what-is-sustainable-crypto-mining/>.
- [137] <https://cfc-stmoritz.com/industry-insights/leveraging-bitcoin-mining-to-build-a-more-sustainable-future>.
- [138] <https://www.investopedia.com/tech/whats-environmental-impact-cryptocurrency/>.
- [139] <https://affidaty.io/blog/en/2024/01/bitcoin-mining-renewable-energy/#:~:text=Bitcoin%20mining%20can%20therefore%20play,of%20investment%20even%20more%20attractive>.
- [140] <https://atlas21.com/marathon-heats-80000-finnish-homes-with-bitcoin-mining-heat/>.
- [141] <https://atlas21.com/ethiopia-transforms-hydroelectric-power-into-bitcoin-mining-generates-18-of-national-revenue/>.
- [142] <https://www.theafricareport.com/372234/what-to-watch-in-2025-africa-making-a-mint-from-crypto-mining-boom/>.
- [143] [https://en.wikipedia.org/wiki/Immersion\\_cooling](https://en.wikipedia.org/wiki/Immersion_cooling).
- [144] <https://www.forbes.com/sites/digital-assets/2024/04/18/bitcoin-spurs-major-renewable-projects-from-ocean-thermal-to-hydro/>.
- [145] <https://www.silvercrestgroup.com/bitcoin-energy-consumption-and-context/>.
- [146] <https://www. adesso.de/en/news/blog/energy-transition-and-bitcoin-mining-an-efficient-way-to-stabilise-the-grid.jsp>.

- [147] <https://cryptoforinnovation.org/how-is-renewable-energy-stabilizing-the-grid-for-bitcoin-mining/>.
- [148] <https://it.cointelegraph.com/news/bitcoin-mining-becomes-more-sustainable-mining-council-s-q4-survey>.
- [149] <https://en.bitcoin.it/wiki/Mining>.
- [150] [https://en.bitcoin.it/wiki/Block\\_hashing\\_algorithm](https://en.bitcoin.it/wiki/Block_hashing_algorithm).
- [151] <https://aulascienze.scuola.zanichelli.it/multimedia-scienze/come-te-lo-spiego-scienze/la-complessa-gestione-delle-scorie-nucleari>.
- [152] <https://www.reteambiente.it/normativa/20766/>.
- [153] <https://www.isinucleare.it/it/notizie/criteri-sicurezza-nucleare-radioprotezione-gestione-dei-rifiuti-radioattivi-isin-pubblica>.
- [154] <https://www.hdblog.it/green/articoli/n601873/societa-nucleare-italia-entro-fine-anno/>.
- [155] <https://www.meteoweb.eu/2024/11/nucleare-di-stato-nasce-la-societa-con-enel-ansaldo-e-leonardo/1001704239/>.
- [156] <https://www.reuters.com/business/energy/ansaldo-newcleos-nuclear-reactor-projects-selected-by-eu-2024-10-11/>.
- [157] <https://proton.me/it/wallet/bitcoin-guide-for-newcomers#:~:text=La%20rete%20Bitcoin%20%C3%A8%20nata,riportate%20tutte%20le%20transazioni%20storiche>.
- [158] <https://grafici.altervista.org/produzione-lorda-di-energia-elettrica-per-fonte-nellunione-europea-e-nel-mondo/>.
- [159] <https://www.rinnovabili.it/clima-e-ambiente/cambiamenti-climatici/emissioni-combustibili-fossili-record-2024/>.
- [160] <https://www.qualenergia.it/articoli/emissioni-energia-2023-ancora-crescita-nonostante-fer/>.
- [161] <https://thecryptogateway.it/cina-mining/>.
- [162] <https://www.nationalgeographic.it/cop28-perche-la-rinuncia-ai-combustibili-fossili-resta-un-tabu>.
- [163] <https://www.ilpost.it/2023/12/04/banca-mondiale-energie-fossili/>.
- [164] <https://www.avvenire.it/economia/pagine/rinnovabili-rapporto-aie-sforzi-per-triplicarle-entro-il-2030>.
- [165] <https://www.ilfattoquotidiano.it/2024/11/19/g20-brasile-non-aiuta-cop29-tutti-impegnati-affossare-addio-fossile/7773660/>.
- [166] [https://it.wikipedia.org/wiki/Popolazione\\_mondiale](https://it.wikipedia.org/wiki/Popolazione_mondiale).
- [167] <https://valori.it/coalizione-climate-action-100/>.
- f) Altri siti generali consultati per lo studio:
- [168] <https://www.mit.edu/>.
- [169] <https://www.weforum.org/>.
- [170] <https://unric.org/it/>.
- [171] <https://forbes.it/>.
- [172] <https://www.nature.com/>.
- [173] <https://ourworldindata.org/>.
- [174] <https://www.worldbank.org/ext/en/home>.
- [175] <https://www.oecd.org/en/html>.
- [176] <https://www.ecb.europa.eu/home/html/index.en.html>.
- [177] [https://commission.europa.eu/index\\_it](https://commission.europa.eu/index_it).
- [178] <https://www.consilium.europa.eu/en/european-council/>.
- [179] <https://www.eib.org/en/index>.
- [180] <https://www.imf.org/en/Home>.
- [181] <https://osservatoriocpi.unicatt.it/>.
- [182] <https://www.energyinst.org/statistical-review#regional-overview>.
- [183] <https://www.nato.int/>.
- [184] <https://www.climateaction100.org/>.
- [185] <https://www.netzeroassetmanagers.org/>.
- [186] <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20230401054904/https://ukcop26.org/>.
- [187] <https://bitcoinminingcouncil.com/>.
- [188] <https://cointelegraph.com/>.