

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

SCIENZA DECENTRALIZZATA: COME LA BLOCKCHAIN INFLUENZA IL PROCESSO DI CREAZIONE DELLA CONOSCENZA

In collaborazione con:

LINKS FOUNDATION

Dott. Enrico Ferro

Dott. Roberto Moncada

Relatore

Prof. Carlo Cambini

Studente

Marta Lorusso

A.A 2024 - 2025

Indice

| | |
|--|----|
| 1. Capitolo 1 Introduzione | 1 |
| 2. Capitolo 2 Stato dell'arte | 4 |
| 2.1 Sistemi DLT e Blockchain | 4 |
| 2.2 Storia e funzionamento della Blockchain..... | 5 |
| 2.3 Tipologie di Blockchain | 9 |
| 2.4 Tokenomics | 11 |
| 2.5 Ethereum e smart contract..... | 14 |
| 2.6 Knowledge value chain | 16 |
| 2.6.1 Criticità | 23 |
| 3. Capitolo 3 Presentazione dei dati..... | 28 |
| 3.1 Metodologia..... | 28 |
| 3.2 Flowchart..... | 33 |
| 4. Capitolo 4 Risultati qualitativi..... | 39 |
| 4.1 Soluzioni blockchain-based..... | 39 |
| 4.2 Impatto qualitativo..... | 47 |
| 5. Capitolo 5 Risultati quantitativi..... | 52 |
| 5.1 Scheda di Progetto | 52 |
| 5.2 Risultati Complessivi..... | 55 |
| 5.2.1 Nel processo di creazione della conoscenza | 60 |
| 5.2.2 Regione ammissibile..... | 65 |
| 6. Capitolo 6 Conclusioni | 71 |
| 7. Bibliografia | 76 |

Lista delle Figure

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Blockchain [Fonte: Rizzoli Education] | 5 |
| Figura 2.2 – <i>General Morphological Analysis (GMA)</i> [Fonte: Freni, Ferro e Moncada (2022)]..... | 13 |
| Figura 2.3 – Piramide di DIKW [Fonte: Ermine (2013)] | 17 |
| Figura 3.1 – Decentralized Science Ecosystem | 33 |
| Figura 4.1 – Research Layer Value Chain | 48 |
| Figura 4.2 – Knowledge Layer Value Chain | 50 |
| Figura 5.1 – Scheda di progetto | 53 |
| Figura 5.2 – Overview dei progetti | 56 |
| Figura 5.3 – Raggruppamento dei progetti | 57 |
| Figura 5.4 – Posizionamento dei casi studio | 66 |
| Figura 5.5 – Regione ammissibile con $N = 3$ | 67 |
| Figura 5.6 – Regione ammissibile con $N = 4$ | 68 |
| Figura 5.7 – Regione ammissibile con $N = 5$ | 68 |

Lista delle Tabelle

Non è stata trovata alcuna voce dell'indice delle figure.

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi decenni la produzione di conoscenza scientifica è stata trasformata dalla digitalizzazione dei processi di ricerca e dalla crescente interdipendenza tra discipline, infrastrutture computazionali e reti globali di collaborazione. Tuttavia, la catena del valore della conoscenza continua a essere in larga misura governata da architetture centralizzate: l'accesso ai risultati è spesso mediato da intermediari editoriali e database proprietari, le decisioni di finanziamento sono concentrate in un numero limitato di enti valutatori e la validazione è delegata a meccanismi di peer review che, pur garantendo qualità, introducono colli di bottiglia temporali e asimmetrie informative. In settori caratterizzati da elevata velocità di innovazione, tali rigidità si traducono in ritardi nella circolazione dei risultati, duplicazioni di sforzo e difficoltà nel riuso sistematico di dati e contributi, riducendo l'impatto della ricerca e la sua capacità di tradursi tempestivamente in valore sociale, economico e tecnologico. Parallelamente, negli stessi anni si è consolidato un insieme di iniziative riconducibili al paradigma dell'Open Science, orientate a rendere più trasparenti e accessibili i prodotti della ricerca (articoli, dati, codici, protocolli) e a promuovere una maggiore riproducibilità. Nonostante i progressi, molte delle criticità strutturali permangono: i processi di coordinamento rimangono costosi, la qualità è frequentemente inferita tramite proxy bibliometriche, e la governance delle infrastrutture digitali tende a concentrarsi in soggetti che controllano l'accesso, i metadati e le regole di utilizzo. Ne deriva un paradosso: la conoscenza può essere tecnicamente disponibile, ma non necessariamente verificabile, interoperabile o riutilizzabile in modo efficiente lungo l'intera pipeline scientifica.

In questo contesto si inserisce la tecnologia blockchain, intesa come specifica implementazione delle Distributed Ledger Technologies (DLT) capace di combinare registri distribuiti, meccanismi di consenso e crittografia per garantire integrità e tracciabilità dei dati in ambienti caratterizzati da bassa fiducia tra attori. La programmabilità introdotta dagli smart contract e la possibilità di tokenizzare diritti e incentivi economici aprono inoltre la strada a forme di coordinamento alternative, nelle quali l'allocazione di risorse, la gestione della proprietà intellettuale e la definizione delle regole di partecipazione possono essere espresse

in modo esplicito, verificabile e, in parte, automatizzato. Tali proprietà hanno alimentato la nascita di ecosistemi Web3 e, più recentemente, di un filone applicativo specifico denominato Decentralized Science (DeSci). La DeSci può essere descritta come l'insieme di protocolli e piattaforme che impiegano blockchain, smart contract e tokenomics per riconfigurare alcune funzioni chiave dell'ecosistema scientifico: finanziamento della ricerca (ad esempio tramite modelli comunitari e DAO), governance dei progetti e dei risultati, attribuzione e remunerazione dei contributi, gestione del versioning e della provenienza dei dati, e scambio controllato di asset informativi. L'obiettivo dichiarato è ridurre dipendenze da intermediari centralizzati e mitigare criticità note della knowledge value chain – come l'asimmetria informativa, la validazione sterile, il rischio di scomparsa dei contributi e la lentezza nella circolazione – rendendo più permeabile la partecipazione e più trasparente la qualità dei prodotti scientifici. Nonostante l'interesse crescente, il potenziale trasformativo della blockchain nel dominio scientifico non può essere assunto a priori. La decentralizzazione “di principio” non coincide necessariamente con decentralizzazione “di fatto”: la presenza di un registro distribuito può coesistere con architetture operative fortemente accentrate, e la tokenizzazione può produrre incentivi efficaci o, al contrario, distorsioni che penalizzano la qualità scientifica. Si rende quindi necessario un inquadramento analitico che distingua tra promesse tecnologiche e configurazioni osservabili, valutando come le scelte architettoniche impattino concretamente sulle fasi del processo di creazione della conoscenza.

Alla luce di queste premesse, la presente tesi ha un duplice obiettivo. Da un lato, intende comprendere come l'adozione della blockchain influenzi, in termini qualitativi, la catena del valore della conoscenza scientifica; dall'altro, mira a misurare in modo comparabile il grado di decentralizzazione effettivamente raggiunto dalle principali piattaforme DeSci attualmente attive. Le due domande di ricerca che guidano il lavoro sono: (RQ1) in che modo l'adozione della tecnologia blockchain influenza il processo di creazione della conoscenza lungo le sue fasi (creazione, validazione, archiviazione, distribuzione e applicazione)?; (RQ2) quale livello di decentralizzazione risulta osservabile, sul piano strutturale, nelle configurazioni operative delle piattaforme DeSci, e con quali combinazioni di cooperazione diffusa e concentrazione di centralità?

Per rispondere a tali quesiti, l'approccio metodologico combina una fase teorico-interpretativa e una fase empirico-quantitativa. La prima si fonda su una revisione strutturata della letteratura per definire i costrutti tecnologici rilevanti (blockchain, smart contract e tokenomics) e per ricostruire le principali criticità della knowledge value chain. Su questa base viene poi condotta un'esplorazione

dell'ecosistema DeSci con l'obiettivo di identificare le piattaforme attive e di mapparle mediante un flowchart multilivello che distingue infrastrutture blockchain (base layer), protocolli e standard (protocol layer) e applicazioni (application layer), ulteriormente articolate in research layer e knowledge layer. Il flowchart assume qui il ruolo di artefatto analitico, utile sia a formalizzare la riconfigurazione della value chain indotta dalla blockchain sia a collegare criticità e possibili soluzioni abilitate dalla tecnologia.

La seconda fase estende l'analisi con strumenti di network analysis e teoria dei grafi. Ciascuna piattaforma viene rappresentata tramite un actors mapping in cui gli stakeholder sono modellati come nodi e le relazioni operative come elementary cooperations. A partire dai grafi risultanti, vengono calcolati due indicatori complementari: un indice di concentrazione della centralità (Cx), derivato dalla centralization di Freeman, e un indice di decentralizzazione delle cooperazioni (Dx), interpretato come proxy del livello di interazione e coordinamento distribuito. La lettura congiunta di Cx e Dx consente di mettere in relazione la struttura di potere e la densità delle cooperazioni con le diverse fasi del processo di produzione della conoscenza, evidenziando configurazioni ricorrenti e casi ibridi.

Il contributo principale della tesi consiste dunque nell'offrire un quadro integrato – teorico e misurativo – per analizzare la DeSci come sistema di coordinamento, superando descrizioni meramente normative e fornendo criteri osservabili per discutere i trade-off tra decentralizzazione ed efficienza operativa.

Capitolo 2

Stato dell'arte

2.1 Sistemi DLT e Blockchain

La tecnologia blockchain si colloca all'interno di una categoria più ampia di soluzioni informatiche nota con l'acronimo DLT (Distributed Ledger Technologies), termine con il quale si fa riferimento alle tecnologie basate sul concetto di *registro distribuito*. La letteratura scientifica e istituzionale propone una pluralità di definizioni di DLT, ciascuna delle quali evidenzia specifici aspetti di tali sistemi. Ad esempio, la World Bank (Natarajan et al. 2017) descrive le DLT come strumenti che consentono di registrare, condividere e sincronizzare transazioni e dati all'interno di una rete distribuita composta da molteplici partecipanti. A tale definizione si affiancano interpretazioni che sottolineano ulteriori elementi costitutivi, come i meccanismi di consenso: in quest'ottica si considerano le DLT come sistemi distribuiti, crittograficamente sicuri, nei quali il consenso è ottenuto tramite incentivi economici. Altre prospettive pongono invece l'accento sulle caratteristiche tecniche delle DLT; in particolare, la Bank of England (Benos et al. 2017) le definisce come database distribuiti, in cui ciascun nodo della rete mantiene una copia sincronizzata delle informazioni, distinguendole dalle architetture distribuite tradizionali per tre elementi fondamentali: (i) la decentralizzazione delle operazioni, (ii) l'affidabilità anche in contesti privi di fiducia reciproca tra gli attori, e (iii) l'implementazione di tecniche crittografiche per garantire sicurezza e integrità dei dati.

Alla luce di queste definizioni, è possibile ricondurre le diverse interpretazioni a un nucleo concettuale comune: una DLT può essere intesa come un sistema di registro distribuito, detenuto e gestito da più nodi appartenenti a una rete, all'interno del quale le informazioni vengono archiviate e possono essere lette o modificate dai partecipanti secondo regole condivise. Le differenze tra le varie tipologie di DLT risiedono principalmente nei meccanismi di governance, nelle modalità di consenso adottate per la validazione delle operazioni e nella struttura del registro.

È proprio in questo quadro di eterogeneità che si inserisce la blockchain, la quale rappresenta una specifica implementazione di DLT. Essa si caratterizza per l'organizzazione delle informazioni in blocchi concatenati in ordine cronologico, a

formare una catena digitale. Ciascun blocco è collegato al precedente attraverso strumenti crittografici, e la validazione delle transazioni avviene tramite algoritmi di consenso distribuito. Questo insieme di caratteristiche rende i dati registrati nella blockchain immutabili e resistenti a manomissioni, conferendo a tale tecnologia un ruolo centrale tra le diverse declinazioni delle DLT.

2.2 Storia e funzionamento della Blockchain

Dopo aver distinto le tecnologie a registro distribuito (DLT) dalla blockchain, è possibile soffermarsi sul funzionamento di quest'ultima, a partire dalle sue origini storiche. La blockchain nasce infatti in un preciso contesto socio-economico: nell'ottobre del 2008, in seguito alla crisi finanziaria globale, Satoshi Nakamoto – pseudonimo dietro il quale si cela una o più persone – pubblica il white paper intitolato *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System* (Nakamoto 2008). In esso viene presentato un sistema di pagamento elettronico basato su una rete peer-to-peer, concepito per operare senza la necessità di un'autorità centrale, come le istituzioni finanziarie. Questo lavoro segna l'inizio della prima blockchain, ossia quella alla base di Bitcoin, che diviene ufficialmente operativa il 3 gennaio 2009 con la creazione del cosiddetto *blocco genesis*. L'obiettivo iniziale del progetto era quello di disporre di un registro pubblico e distribuito nel quale registrare in maniera sicura e trasparente le transazioni eseguite con la moneta digitale Bitcoin.



Figura 2.1 – Blockchain [Fonte: Rizzoli Education]

Dal punto di vista tecnico, la blockchain può essere considerata come un database distribuito organizzato in blocchi collegati tra loro in sequenza cronologica. Ciascun blocco contiene le informazioni (solitamente transazioni) relative a un determinato intervallo temporale (*timestamping*) e, oltre ai dati, conserva un riferimento crittografico (*hash*) al blocco precedente. L'hash è il risultato di una funzione matematica che associa un input di dimensioni arbitrarie a una stringa di lunghezza fissa, garantendo così un legame univoco tra blocchi successivi. Questo meccanismo costituisce uno degli elementi di sicurezza

crittografica che conferiscono alla blockchain proprietà di affidabilità e immutabilità. La struttura lineare e cronologica della catena assicura, infatti, che ogni nuovo blocco si aggiunga al precedente in maniera sicura, generando una sequenza resistente a manomissioni.

La sicurezza della blockchain è ulteriormente rafforzata dalla sua natura distribuita: la gestione della catena non è affidata a un'entità centrale, bensì a una rete peer-to-peer in cui ciascun nodo mantiene una copia completa del registro. Ne consegue che un potenziale attacco volto a modificare i dati dovrebbe coinvolgere simultaneamente la maggioranza dei nodi della rete (almeno il 51%), rendendo estremamente difficile alterare retroattivamente le informazioni.

Un aspetto fondamentale del funzionamento della blockchain è rappresentato dai meccanismi di consenso, ossia i protocolli che permettono ai nodi della rete di concordare sull'aggiunta di nuovi blocchi. Nel caso di Bitcoin, il meccanismo introdotto è chiamato *Proof of Work* (PoW), ed è finalizzato a risolvere il problema della *double spending*, ovvero la possibilità che lo stesso token digitale venga speso più volte. Tale problematica, già anticipata nel white paper di Nakamoto (2008), è assimilabile al più generale *Byzantine Generals Problem* (Lamport et al. 2019). Il problema, utilizzando la metafora di 3 generali bizantini, affronta la problematicità di un sistema informatico nel raggiungere un consenso o accordo in casi imperfetti ovvero in situazioni in cui le informazioni sono discordanti. La metafora descrive una situazione in cui ci sono n generali in punti diversi fuori dalle mura di una città nemica da attaccare. I generali devono accordarsi su che decisione prendere, se attaccare o meno, e possono comunicare tra loro solo tramite i messaggeri. Tra questi però è altamente probabile, se non sicuro, che vi siano dei traditori. Da qui nasce la necessità di determinare una strategia unica da far adottare ai generali "leali" al fine di impedire, invece, ai traditori di far adottare la strategia sbagliata. Quello che accade in queste situazioni è che vi è un'assenza di fiducia tra i partecipanti poiché, a causa della presenza di traditori che inviano informazioni imperfette, questi non possono sapere con certezza quale sia il messaggio corretto e quindi la strategia comune da intraprendere.

Riportando l'attenzione alla blockchain, in particolare modo a quella di Bitcoin, questa situazione è rappresentata dal problema del double spending che nel whitepaper di Satoshi Nakamoto viene risolto con l'introduzione di un meccanismo di consenso chiamato "Proof of Work" (PoW). La *PoW* prevede che alcuni nodi della rete, detti *miner*, risolvano complessi problemi matematici basati sulla funzione hash crittografica SHA-256. La risoluzione di tali problemi, onerosa in termini di calcolo e di energia, rappresenta la prova che un nodo ha dedicato una

significativa quantità di risorse al processo di validazione. Il primo nodo che raggiunge la soluzione ottiene una ricompensa in Bitcoin, incentivo che ha garantito la sostenibilità del sistema (Soldavini, P. 2020). Secondo il principio “una CPU, un voto”, la catena considerata valida è quella più lunga, in quanto risultato del maggiore sforzo computazionale. Se la decisione di maggioranza è controllata da nodi onesti, la catena onesta crescerà più velocemente e supererà eventuali catene concorrenti. Per modificare un blocco passato, un utente malintenzionato dovrebbe rifare la PoW del blocco e di tutti i blocchi successivi ad esso e poi raggiungere e superare il lavoro dei nodi onesti. La PoW è stato il primo meccanismo creato ma è quello ad oggi più dispendioso in termini di tempi ed energia; inoltre tale modalità può incorrere nel cosiddetto attacco del 51% che si verifica quando un nodo “malevolo” possiede oltre metà della potenza di calcolo totale sulla rete (il 51%), avendo la possibilità di convalidare qualsiasi operazione egli desideri.

Con il tempo sono stati sviluppati altri algoritmi di consenso, tra cui la *Proof of Stake* (PoS), che sostituisce i miner con validatori, i quali non usano la potenza di elaborazione per confermare i blocchi, ma “scommettono” i loro fondi sui blocchi ritenuti validi. Un validatore può essere chiunque sia disposto a dimostrare di possedere un certo ammontare di criptovaluta sulla rete, e un algoritmo determina quali validatori saranno scelti per ogni blocco. Mentre i miner sono incentivati con l’emissione di nuove monete, i validatori ricevono soltanto una percentuale delle commissioni incluse nel blocco, proporzionale all’importo che avevano precedentemente investito (Edwood 2020). Nel caso della PoS l’attacco del 51% non riguarderebbe la potenza di calcolo ma il numero di monete possedute, quindi un utente “malevolo” dovrebbe possedere più della metà delle criptovalute in circolazione. Tale situazione è chiaramente poco probabile anche perché in caso di una concentrazione così forte il sistema sarebbe centralizzato e nessuno lo utilizzerebbe. Nonostante la PoS presenti questi vantaggi c’è comunque una criticità legata alla possibilità di avere una forma di centralizzazione. Difatti, possedere più crypto significa avere maggiore probabilità di esser accettato come validatore e questo comporta una maggiore ricompensa che a sua volta fa aumentare il numero di crypto e quindi di peso per la prossima validazione.

Un’alternativa che è stata introdotta per cercare di diminuire il rischio di centralizzazione che è presente nella PoS è rappresentata dalla Delegate Proof of Stake (DPoS) dove oltre ai validatori ci sono anche i deleganti. Questi ultimi effettuano una votazione per scegliere quali validatori dovrebbero essere utilizzati per la convalida di un blocco.

Oltre a questi, si sono affermati altri modelli di consenso con specifiche finalità:

- **Proof of Authority (PoA)**, adottata in contesti *permissioned*, dove la validazione è affidata a nodi identificati e autorizzati, come nel caso di VeChain o alcune reti di test di Ethereum. È particolarmente adatta ad applicazioni aziendali in cui è necessario garantire affidabilità e rapidità delle transazioni.
- **Byzantine Fault Tolerance (BFT)** e le sue varianti, come **Practical BFT (PBFT)** o **Tendermint**, sono progettati per raggiungere un accordo deterministico sull'ordine e sulla validità delle transazioni attraverso un processo di comunicazione diretta tra i nodi validatori. Il consenso viene ottenuto mediante una sequenza di fasi — tipicamente *proposta, votazione e conferma* — che garantiscono che tutti i nodi onesti concordino sull'aggiunta di un nuovo blocco alla catena; mirano a garantire il consenso anche in presenza di nodi malevoli, assumendo che fino a un terzo dei partecipanti possa comportarsi in modo scorretto. Tali protocolli trovano largo impiego nelle blockchain di tipo *consortium* (es. Hyperledger Fabric, Cosmos).
- **Proof of History (PoH)**, utilizzata da Solana, che introduce un meccanismo crittografico di ordinamento temporale verificabile (*verifiable delay function*, VDF), che consente di stabilire una sequenza cronologica certa tra le transazioni, prima ancora che esse vengano validate dai nodi della rete. Quando una transazione o un evento viene inserito nella sequenza, è possibile dimostrare crittograficamente *quando* è avvenuto rispetto agli altri eventi, senza la necessità di un riferimento temporale esterno. All'interno di Solana, la Proof of History è combinata con una variante della Proof of Stake, in cui i validatori utilizzano la sequenza temporale PoH per ordinare le transazioni e raggiungere rapidamente il consenso sullo stato della blockchain.
- **Proof of Space (PoSp)**, nasce con l'idea di fondo di sostituire la potenza computazionale con una risorsa di archiviazione: i nodi della rete dimostrano di destinare una porzione del proprio spazio su disco al mantenimento di specifici dati crittografici; un nodo “plotta” una parte del proprio hard disk, generando e memorizzando una serie di funzioni hash pre-calcolate. Quando la rete emette una nuova sfida (challenge), ciascun nodo verifica se all'interno del proprio spazio memorizzato è presente una soluzione che soddisfi la condizione richiesta. Il nodo che fornisce la risposta più rapida o più vicina ottiene il diritto di creare il blocco successivo.
- **Proof of Time (PoT)**, si basa sull'uso di una **Verifiable Delay Function (VDF)**, una funzione matematica che richiede un tempo determinato per essere calcolata ma che può essere facilmente verificata da chiunque. In tal modo, il sistema garantisce che tra la generazione di due blocchi

consecutivi trascorra effettivamente un periodo minimo di tempo, impedendo la creazione simultanea di blocchi multipli o la manipolazione artificiale della catena.

- **Proof of Burn (PoB)**, in cui i partecipanti “bruciano” (rendono inutilizzabili) una parte delle proprie monete per dimostrare il loro impegno, ricevendo in cambio il diritto di validare blocchi.
- Infine, si diffondono **modelli ibridi** (come *PoW/PoS* o *PoS+BFT*), che combinano diversi meccanismi per bilanciare sicurezza, efficienza e decentralizzazione.

Un'ulteriore componente essenziale della blockchain è rappresentata dalla crittografia a doppia chiave, che garantisce autenticazione e autorizzazione senza la necessità di un ente centrale. Ogni partecipante possiede una coppia di chiavi: una privata, segreta e numerica, e una pubblica, derivata dalla prima tramite funzioni di hash e visibile a tutti. Le transazioni vengono firmate digitalmente con la chiave privata, e la validità della firma è verificabile tramite la corrispondente chiave pubblica. In questo modo si assicura l'integrità delle operazioni e l'impossibilità di alterare retroattivamente le transazioni, poiché qualsiasi modifica invaliderebbe l'hash e renderebbe la transazione non verificabile (CoinDesk, 2017).

2.3 Tipologie di Blockchain

A seguito della nascita della blockchain di Bitcoin, numerose organizzazioni, ma anche singoli sviluppatori e ricercatori, hanno avviato progetti finalizzati sia alla realizzazione di nuove blockchain, sia all'esplorazione di possibili applicazioni in ambiti differenti da quello delle criptovalute. Questo progressivo ampliamento di prospettive ha condotto alla definizione di criteri di classificazione utili a distinguere le diverse tipologie di blockchain.

Un primo criterio di differenziazione riguarda il grado di accessibilità della rete, ossia l'insieme di regole che determinano chi può partecipare al sistema e con quali modalità. Da questo punto di vista, si distinguono due categorie principali: le blockchain permissionless e le blockchain permissioned (Miller 2019). Le prime sono caratterizzate dall'assenza di vincoli di accesso: chiunque, a fronte di un investimento di risorse (ad esempio criptovaluta nei sistemi *PoS* o potenza computazionale nei sistemi *PoW*), può partecipare alla rete e contribuire al consenso distribuito. Le seconde, invece, prevedono un processo di selezione stabilito a priori, attraverso il quale soltanto soggetti autorizzati possono entrare a far parte del meccanismo di governance e di validazione della rete.

A partire da questa distinzione di base, è possibile individuare ulteriori tipologie (Buterin, V. 2015):

- **Blockchain pubbliche:** rientrano nella categoria permissionless e consentono a chiunque non solo di partecipare al consenso, ma anche di leggere e inviare transazioni. Sono completamente decentralizzate e comprendono esempi noti come Bitcoin ed Ethereum.
- **Blockchain di consorzio:** prevedono che un gruppo predefinito di nodi gestisca il meccanismo di consenso. Possono, tuttavia, garantire accesso pubblico alla lettura e, in alcuni casi, anche all'invio di transazioni.
- **Blockchain private:** appartengono alla categoria permissioned e centralizzano il processo di consenso all'interno di una singola organizzazione, pur potendo offrire accesso pubblico ai dati.

Un'ulteriore modalità di classificazione si basa invece sull'evoluzione storica e funzionale della tecnologia, che ha dato luogo a tre generazioni distinte di blockchain (Efanov e Roschin 2018):

- **Blockchain 1.0 – Digital currency**
Questa prima fase coincide con l'introduzione di Bitcoin e comprende le blockchain progettate per la creazione di criptovalute. Esse hanno reso possibile, per la prima volta, uno scambio diretto, sicuro ed economico di valore digitale tra due soggetti, senza necessità di intermediari.
- **Blockchain 2.0 – Digital economy**
La seconda generazione si estende oltre il semplice ambito dei pagamenti, aprendo la strada alla gestione di asset digitali di natura diversa. Con l'avvento di Ethereum, il concetto di smart contract è stato effettivamente implementato su blockchain. Lo smart contract, infatti, viene introdotto nel 1996 da Nick Szabo che lo definisce come "una serie di impegni accordati tra due parti, codificati in forma digitale, con incluso i protocolli da seguire affinché questi impegni vengano mantenuti dalle due parti" (Szabo 1996). Sostanzialmente gli smart contracts nascono come software per automatizzare l'esecuzione di obbligazioni contrattuali. Grazie alla blockchain di Ethereum, gli smart contracts vengono effettivamente utilizzati e rappresentano dei semplici programmi scritti, distribuiti ed eseguiti all'interno di un sistema informatico decentralizzato, sicuro, immutabile ed affidabile come, appunto, la blockchain. In questo modo per gli sviluppatori è possibile implementare programmi decentralizzati con nuovi token che rappresentino asset di valore diversi dalla semplice valuta.
- **Blockchain 3.0 – Digital society**
La terza generazione si caratterizza per un ampliamento degli ambiti applicativi oltre la sfera economica e finanziaria, includendo settori come

sanità, identità digitale, istruzione, arte e copyright, governance e ricerca scientifica. In questo contesto trovano spazio anche applicazioni legate all'**Internet of Things (IoT)** e alle **smart city**, nelle quali la blockchain abilita interazioni *machine-to-machine*. Le blockchain di terza generazione affrontano inoltre sfide cruciali come la scalabilità – tramite l'adozione di soluzioni multilivello, quali il Lightning Network per Bitcoin – e l'interoperabilità tra diverse reti distribuite, con l'obiettivo di supportare applicazioni complesse in ecosistemi altamente connessi.

2.4 Tokenomics

Considerando le sue caratteristiche tecniche e i campi di applicazione, che ne hanno determinato una progressiva evoluzione generazionale, la blockchain può essere a pieno titolo definita una tecnologia dirompente (*disruptive technology*). La sua natura rivoluzionaria è evidente fin dalla prima implementazione con Bitcoin (Blockchain 1.0), che ha trasformato radicalmente il paradigma tradizionale dei pagamenti: da un modello centralizzato, basato sulla fiducia riposta in un ente garante, si è passati a una configurazione diametralmente opposta, caratterizzata da decentralizzazione e assenza di fiducia verso intermediari.

Con la successiva generazione (Blockchain 2.0), tali principi sono stati generalizzati e applicati non più soltanto al sistema monetario, ma a un'ampia varietà di scenari incentrati sulla gestione e lo scambio di asset digitali. Da qui prende forma il concetto di tokenizzazione, ossia il processo attraverso cui un valore viene rappresentato da un'unità digitale (*token*) scambiabile e negoziabile in rete (Freni, P. 2020). La portata innovativa di tale processo risiede nella possibilità di associare a un token non soltanto risorse economiche tradizionali, ma anche elementi intangibili come lavoro, reputazione, diritti di voto, copyright o proprietà intellettuale. In questo modo, la blockchain estende la nozione di valore trasferibile e quantificabile, creando sistemi di incentivi e meccanismi di distribuzione della ricchezza basati su regole programmate e verificabili.

La tokenizzazione può dunque essere interpretata come una forma di digitalizzazione del valore, che, grazie alla natura immutabile e distribuita della blockchain, diventa liberamente scambiabile in rete in modo sicuro. Nel web tradizionale, l'informazione può essere replicata e diffusa a costo marginale quasi nullo, aspetto positivo per la condivisione dei contenuti, ma problematico quando l'informazione stessa deve rappresentare un bene unico e di valore attribuibile a un proprietario (Goodman, E. P. 2004). La blockchain introduce in questo scenario il concetto di scarsità digitale, elemento fondante nei processi di tokenizzazione. La

scarsità digitale può assumere forme diverse a seconda del contesto: nel caso di Bitcoin, si traduce nel numero massimo di monete che possono essere minate; in Ethereum, invece, si può manifestare nella creazione di *non fungible tokens* (NFT), ovvero oggetti digitali unici e non replicabili. In termini generali, essa rappresenta una limitazione programmata all'accesso o alla disponibilità di beni, servizi o informazioni digitali (Brekke, J. K. and Fischer, A. 2020). In questo senso, il token stesso costituisce il bene digitale “scarso”, in quanto incapsula un valore specifico e lo rende gestibile come un vero e proprio asset digitale.

La creazione di token è un processo aperto, accessibile tanto a individui quanto a organizzazioni, che ne definiscono le regole di utilizzo e circolazione. Questo porta alla nascita della cosiddetta tokenomics, in quanto il processo di tokenizzazione può essere visto come la creazione di un sistema economico auto-governato, le cui regole sono programmate dall'emittente del token stesso (Freni, P. 2020). Proprio per questa flessibilità, più che tentare di fornire una definizione univoca di token – che risulterebbe inevitabilmente riduttiva – risulta più appropriato analizzarne le dimensioni e gli attributi principali.

Una prima distinzione ad alto livello, adottata dal MiCA, individua tre categorie principali:

- **Electronic money token (EMT)**, sono token che mirano alla stabilità ancorandosi al valore di una singola valuta ufficiale (es. euro), avvicinandosi quindi alla logica della moneta elettronica.
- **Asset-referenced token (ART)** sono cripto-attività che dichiarano di mantenere un valore stabile facendo riferimento a **un paniere** di valori o diritti (che può includere una o più valute, altre attività o combinazioni di esse).
- **Other Crypto Asset**, categoria residuale che include i token diversi da ART ed EMT e nella quale rientrano tipicamente gli **utility token**, ossia token concepiti principalmente per fornire accesso a un bene o a un servizio offerto da un'emittente.

Negli ultimi anni, con la proliferazione di piattaforme decentralizzate, sono emersi sempre più frequentemente token “ibridi”, i quali combinano caratteristiche tipiche degli utility e degli investment token, rendendo più complessa la classificazione tradizionale. Per questa ragione, la letteratura più recente ha cercato di elaborare modelli analitici e framework di riferimento in grado di cogliere la multidimensionalità del fenomeno.

Un contributo significativo in questa direzione è rappresentato dal framework morfologico per la classificazione dei token proposto da Freni, Ferro e Moncada (2022). Tale modello, elaborato attraverso la metodologia del *General Morphological Analysis* (GMA), consente di analizzare in maniera sistematica le differenti caratteristiche dei token, superando la rigidità di una categorizzazione tripartita e restituendo una visione più articolata delle potenzialità economiche e funzionali associate ai processi di tokenizzazione.

| TECHNOLOGY | | | | BEHAVIOR | | | | | | COORDINATION | | | |
|-----------------------------|----------------|-----------------------|---------------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|------------------|----------------------------------|--------------------|---|
| Chain | Permission | Number of Blockchains | Representation Type | Burnability | Expirability | Spendability | Fungibility | Divisibility | Tradability | Underlying Value | Supply Strategy | Incentive Enablers | Incentive Drivers |
| New Chain, new code | Permissioned | Single Chain | Common | Burnable | Expirable | Spendable | Fungible | Fractional | Tradable | Asset-based | Schedule-based | Right to work | Get access (to content/service) |
| New Chain, forked code | Permissionless | Cross Chain | Unique | Non-Burnable | Non-Expirable | Non-Spendable | Non-Fungible | Whole | Non-Tradable | Network Value | Pre-mixed scheduled distribution | Right to use | Get discount |
| Forked Chain, forked Code | | | | | | | Hybrid | Singleton | Delegable | Share-like | Pre-mixed one-off distribution | Right to vote | Get revenue (increase existing business) |
| Issued on top of a protocol | | | | | | | | | | | Discretionary | Unit of account | Get reward (new economy creation) |
| | | | | | | | | | | | Matching demand | Medium of exchange | Dividend/Earning Potential (for holding or staking) |
| | | | | | | | | | | | | Store of value | Appreciation potential (Speculation) |
| | | | | | | | | | | | | | Participate in governance |
| | | | | | | | | | | | | | Gain reputation |

Figura 2.2 – *General Morphological Analysis* (GMA) [Fonte: Freni, Ferro e Moncada (2022)]

Il primo ambito di analisi concerne gli aspetti tecnici del token, con particolare attenzione alle caratteristiche della blockchain su cui esso è implementato e al grado di integrazione con la stessa. In questo senso, è possibile distinguere tra token nativi, strettamente legati all’infrastruttura blockchain di riferimento, e token sviluppati per applicazioni specifiche che ne sfruttano la rete come piattaforma abilitante.

Il secondo ambito, definito del comportamento, riguarda le dimensioni funzionali del token e le azioni che esso consente di intraprendere ai soggetti che lo detengono. Si tratta, dunque, di analizzare il ruolo operativo del token e le modalità con cui esso viene effettivamente utilizzato all’interno dell’ecosistema digitale di riferimento.

Infine, il terzo ambito è quello del coordinamento, che comprende tutte le proprietà e le regole che il token incorpora e che influenzano direttamente le dinamiche comportamentali degli attori coinvolti. In questo dominio vengono quindi analizzati gli elementi che incidono sulla governance e sugli incentivi, modellando le interazioni tra i partecipanti alla rete.

2.5 Ethereum e smart contract

Il rapido e costante sviluppo della tecnologia blockchain ha favorito il rinnovato interesse verso il concetto di *smart contract*, originariamente proposto da Nick Szabo nel 1994. Sebbene non esista una definizione universalmente condivisa, è comunemente riconosciuto che la funzione primaria di un contratto intelligente sia quella di eseguire automaticamente i termini di un accordo nel momento in cui le condizioni previste siano soddisfatte. In tal modo, gli *smart contract* offrono la possibilità di ridurre significativamente i costi di transazione rispetto ai sistemi tradizionali, i quali richiedono l'intervento di un intermediario fidato per garantire l'esecuzione e il rispetto delle clausole contrattuali (Alharby e Moorsel 2017). Szabo (1997) suggerì di tradurre le clausole contrattuali – come garanzie, obbligazioni e condizioni – in codice informatico, incorporandole in una proprietà (hardware o software) capace di auto-applicarle, riducendo così la necessità di intermediari e minimizzando il rischio di eccezioni, sia maligne che accidentali.

Nel contesto della blockchain, gli *smart contract* sono rappresentati da script memorizzati direttamente all'interno del registro distribuito. Poiché le blockchain hanno accesso limitato ai dati esterni (ad esempio, informazioni su prezzi, condizioni meteorologiche o geolocalizzazione), gli *smart contract* possono essere distinti in deterministici e non deterministici. I primi operano esclusivamente con le informazioni presenti sulla blockchain, mentre i secondi necessitano di dati provenienti dall'esterno per poter essere eseguiti. Per colmare tale limitazione vengono impiegati gli *oracle*, terze parti che fungono da ponte tra il mondo esterno e la blockchain, fornendo agli *smart contract* i dati necessari per l'esecuzione.

Tra le principali caratteristiche di uno *smart contract* si annoverano:

- la presenza di uno *storage* che custodisce gli asset registrati sulla blockchain;
- la definizione dettagliata di tutti i possibili scenari previsti dal contratto;
- l'attivazione tramite messaggi o transazioni inviate al suo indirizzo;
- la totale trasparenza del codice, ispezionabile da ogni partecipante alla rete;
- la tracciabilità crittograficamente verificabile di ogni interazione, garantita dall'uso di firme digitali.

La piattaforma che più di ogni altra ha reso possibile l'implementazione diffusa degli *smart contract* è Ethereum. Si tratta di una blockchain pubblica, decentralizzata e open-source, appositamente progettata per consentire la creazione e l'esecuzione di contratti intelligenti, ragione per cui viene definita *blockchain programmabile* (a differenza, ad esempio, di Bitcoin). Finanziata tramite

crowdfunding nel 2014, Ethereum raccolse circa 15,6 milioni di dollari, raggiungendo ad agosto 2021 una capitalizzazione di mercato pari a circa 363,7 miliardi di dollari (Oliva et al. 2020). In origine basata sul meccanismo di consenso *PoW*, la rete ha avviato a fine 2020 la transizione verso il *PoS*, un processo tuttora in corso.

Gli *smart contract* di Ethereum vengono sviluppati prevalentemente in **Solidity**, un linguaggio la cui sintassi è ispirata a JavaScript. Il codice sorgente viene compilato in *bytecode*, eseguito poi dalla **Ethereum Virtual Machine (EVM)**, che utilizza la potenza computazionale dei nodi della rete. Come Bitcoin, Ethereum dispone di una criptovaluta nativa, l'**Ether (ETH)**, impiegata per effettuare transazioni e remunerare i *miner* (o *validator* nel *PoS*). La peculiarità del registro distribuito di Ethereum è quella di mantenere aggiornato non solo lo storico delle transazioni, ma anche lo stato degli *smart contract*. La rete distingue due tipi di account: *user account*, controllati da una chiave privata e non associati a codice eseguibile e *smart contract account*, governati direttamente dal codice degli *smart contract*. Ogni account è identificato da una coppia di chiavi crittografiche: la chiave privata, che consente al titolare di firmare digitalmente le transazioni, e la chiave pubblica, detta indirizzo, necessaria per ricevere fondi o interazioni. Per effettuare una transazione, l'utente deve conoscere l'indirizzo del destinatario e firmare l'operazione con la propria chiave privata, garantendo così l'autenticità della richiesta. Le transazioni costituiscono quindi istruzioni crittograficamente firmate, generate da account esterni, serializzate e inviate alla rete. Accanto ad esse, Ethereum contempla anche i messaggi, utilizzati dai contratti per comunicare tra loro: a differenza delle transazioni, i messaggi non sono serializzati né registrati sulla blockchain, ma restano confinati nell'ambiente di esecuzione.

Ogni transazione, che si tratti di un trasferimento di ETH, della creazione di un contratto o dell'invocazione di una sua funzione, implica un costo computazionale. Tale costo dipende dalla complessità dell'operazione, dalla banda richiesta e dallo spazio di archiviazione necessario. Il meccanismo che regola questo processo è noto come gas: esso è stato introdotto per evitare abusi della rete, quali attacchi di tipo spam o Distributed Denial of Service (DDoS). Per ciascuna transazione l'utente definisce due parametri: il gas price, ossia l'importo che è disposto a pagare per ogni unità di gas consumata (espresso solitamente in Gwei, pari a 10^{-9} ETH), e il gas limit, ovvero la quantità massima di gas utilizzabile. In questo modo, chi invia la transazione conosce anticipatamente il costo massimo dell'operazione e si assicura che l'esecuzione giunga a termine. Se, ad esempio, un contratto includesse un ciclo infinito, l'elaborazione verrebbe automaticamente interrotta non appena esaurito il gas disponibile. Il costo finale è calcolato moltiplicando la quantità

effettiva di gas utilizzata per il gas price stabilito, e tale somma viene sottratta dal saldo del wallet del mittente in ETH. La possibilità di modulare il gas price introduce, inoltre, un meccanismo di priorità: i miner tendono a includere nei blocchi successivi le transazioni con gas price più elevato, così da massimizzare la propria ricompensa.

2.6 Knowledge value chain

Quando si parla di *catena del valore della conoscenza* ci si riferisce a quel percorso articolato attraverso il quale un'organizzazione o una comunità trasforma informazioni grezze, esperienze tacite e dati dispersi in un insieme strutturato di saperi che generano valore concreto: decisioni più efficaci, processi più efficienti, innovazioni di prodotto o di servizio. È un processo che non si esaurisce mai, ma che procede in cicli continui di raccolta, elaborazione, validazione e applicazione.

Il modello **DIKW** è uno dei più famosi e “dati per scontati” nelle letterature sull'informazione e sulla conoscenza.

La rappresentazione grafica più diffusa del DIKW è una piramide, simile alla celebre piramide di Maslow, con i **dati** alla base e la **saggezza** all'apice. Questa rappresentazione spiega implicitamente che gli elementi superiori della piramide hanno bisogno di quelli inferiori per essere definiti, e che possono essere raggiunti solo dopo un processo di trasformazione degli elementi sottostanti.

Il DIKW è quindi una catena in cui:

- l'**informazione** è il risultato dell'elaborazione dei dati,
- la **conoscenza** è il risultato dell'elaborazione delle informazioni,
- la **saggezza** è il risultato dell'elaborazione della conoscenza.

Gli elementi della piramide possono essere visti come dotati di un valore crescente, corrispondente al loro livello. Può quindi essere interpretato come una **catena del valore**.

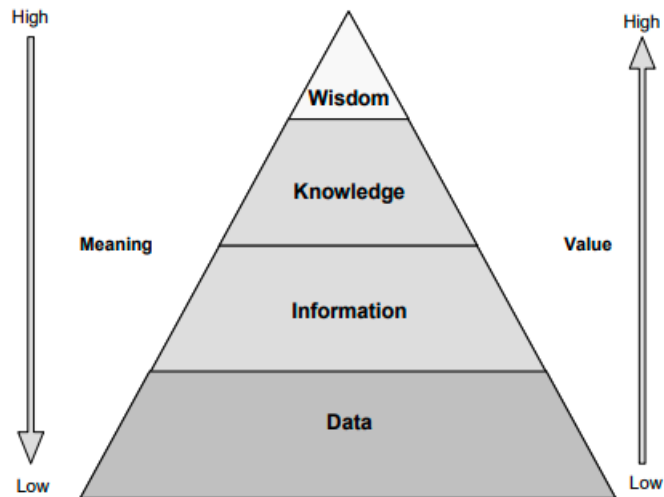


Figura 2.3 – Piramide di DIKW [Fonte: Ermine (2013)]

I dati sono definiti come fatti grezzi, e l'apprendimento sui dati come il processo di accumulazione di fatti. I dati sono materie prime accumulate tramite osservazione umana o basata su macchine.

Nella catena DIKW si introduce un nuovo elemento, chiamato “**segnale**”, che rappresenta la realtà percepita, selezionata ed elaborata attraverso i nostri sensi per ottenere dati.

Trasformare la realtà in dati significa acquisire segni (segnali) attraverso filtri percettivi mediante l'osservazione. Un **segno** è qualcosa che suggerisce la presenza o l'esistenza di un fatto, di una condizione o di una qualità. Più precisamente, un **segnale** è un indicatore che funge da mezzo di comunicazione. Questa è la cosiddetta “**ipotesi semiotica**”, secondo cui la realtà ci viene comunicata come un “sistema di segni”.

Il primo passo pone quindi l'attenzione sulla capacità di **intercettare segnali e input rilevanti**. Le organizzazioni osservano il contesto, monitorano trend tecnologici, ascoltano clienti e partner, raccolgono dati operativi. È una fase di “scouting” o di *sensing*, in cui la sfida principale consiste nel distinguere ciò che è davvero significativo dal rumore di fondo.

La raccolta degli input non può limitarsi a un mero accumulo di dati, ma deve essere orientata alla loro interpretazione e significazione. In questa fase diventa cruciale non solo acquisire informazioni, ma anche **formulare problemi, definire obiettivi e ipotesi di lavoro**. È, in altre parole, il momento della **problematizzazione**, in cui la qualità delle domande poste determina l'efficacia dell'intero processo successivo: quesiti vaghi, mal formulati o insufficientemente focalizzati rischiano infatti di compromettere la produttività cognitiva e applicativa del percorso di ricerca.

L'analisi di Floridi (2010) rafforza questa prospettiva, mostrando come la definizione generale standard di informazione (**GDI – General Definition of Information**) si fondi proprio sulla trasformazione dei **dati** in **informazione significativa**. Un modo diretto per formulare la GDI è attraverso una definizione tripartita:

- l'informazione è costituita da dati,
- i dati devono essere ben formati (ricordiamo che “informazione” deriva dal latino *in-formare*, cioè “dare forma”),
- i dati ben formati devono essere significativi (i dati devono rispettare i significati – la semantica – del sistema, codice o linguaggio scelto).

La trasformazione dell'informazione in conoscenza rappresenta un processo cruciale che si realizza attraverso la costruzione di modelli e l'elaborazione di teorie, all'interno di un percorso di apprendimento. In tale prospettiva, il **modello** può essere inteso come una rappresentazione schematica di un sistema, di un fenomeno o di una teoria, finalizzata a rendere comprensibili le proprietà note o ipotizzate dell'oggetto di studio e ad offrire una base operativa per ulteriori analisi o applicazioni. Il modello, a sua volta, trova fondamento nella **teoria**, che si configura come una spiegazione scientificamente argomentata e condivisa di un determinato aspetto della realtà naturale o sociale.

L'impiego di modelli e teorie si colloca quindi all'interno di un processo di **apprendimento**, inteso come l'insieme delle attività cognitive che consentono all'individuo di acquisire conoscenze. In questo quadro, la conoscenza può essere definita come **informazione dotata di significato**, poiché interpretata e contestualizzata in un determinato ambito.

È tuttavia necessario distinguere tra **conoscenza tacita ed esplicita**. La prima è incorporata nelle esperienze, nelle intuizioni e nelle abilità personali dell'individuo, ed è spesso difficile da formalizzare o comunicare. La seconda, invece, si concretizza in documenti, database, procedure, dataset e mappe

concettuali, assumendo forme registrabili e condivisibili. La trasformazione della conoscenza da tacita a esplicita costituisce un passaggio fondamentale: consente di esternalizzare ciò che risiede nella mente dei singoli, rendendolo accessibile e riutilizzabile da parte della collettività. In questo modo, il sapere individuale si converte in un **asset organizzativo** capace di generare valore e favorire processi di innovazione e apprendimento collettivo.

Tuttavia, non tutto ciò che viene prodotto ha lo stesso valore. È quindi necessaria una fase di **validazione**, in cui idee, modelli e soluzioni vengono verificati, testati e sottoposti a revisione. Questo garantisce che la conoscenza incorporata nei processi sia affidabile e solida. È in questo passaggio che idee, modelli, dati e soluzioni vengono sottoposti a verifica, con l'obiettivo di distinguere ciò che può diventare patrimonio condiviso da ciò che necessita di ulteriori revisioni o che non supera il vaglio critico. La validazione può assumere forme diverse a seconda del contesto: nel mondo scientifico si traduce nella revisione tra pari e nella replicabilità dei risultati, nelle imprese prende la forma di test di prodotto, controlli qualità o sperimentazioni pilota, nelle politiche pubbliche si concretizza in valutazioni d'impatto e consultazioni con la cittadinanza.

Una volta validata, la conoscenza deve essere **organizzata e archiviata**, non basta infatti "averla": serve un **sistema che la renda accessibile, organizzata e riutilizzabile nel tempo**. Se manca questa infrastruttura, il rischio è duplice: da un lato il sapere può essere dimenticato ("cadere nell'oblio"), dall'altro può rimanere formalmente disponibile ma di fatto irraggiungibile perché disperso o mal strutturato.

Cruciale è quindi la **memorizzazione e il recupero** (knowledge storage/retrieval). Con il termine *storage* si intende l'insieme delle attività volte a preservare e rendere disponibile la conoscenza organizzativa nel tempo. Tale processo non si limita alla semplice archiviazione di informazioni in database o documenti, ma include anche la capacità dell'organizzazione di trattenere esperienze, routine e pratiche, che costituiscono la cosiddetta **memoria organizzativa**. In questo senso, lo storage coinvolge sia la conoscenza **esplicita**, facilmente codificabile in supporti materiali o digitali, sia la conoscenza **tacita**, che rimane radicata negli individui, nelle interazioni sociali e nei modelli culturali dell'organizzazione.

Il recupero della conoscenza (*retrieval*) rappresenta l'altro polo di questo processo: non basta infatti conservare conoscenza, occorre che essa sia resa **accessibile e utilizzabile** al momento opportuno. Perché ciò avvenga, la

conoscenza deve essere strutturata e organizzata in modo da permettere un'efficace ricerca e individuazione: tassonomie, metadati, sistemi di classificazione, mappe concettuali e strumenti di indicizzazione sono elementi indispensabili per facilitare il reperimento. La questione si complica ulteriormente quando si tratta di conoscenza tacita, che non può essere ricercata in archivi digitali ma necessita di canali relazionali e sociali – come comunità di pratica, reti informali o strumenti di collaborazione – per essere individuata e mobilitata.

Le tecnologie dell'informazione giocano un ruolo decisivo nell'abilitare entrambi i processi, fungendo da supporto per la creazione di repository, sistemi di document management e piattaforme collaborative. Tuttavia, come evidenziano Alavi e Leidner, la tecnologia da sola non è sufficiente: senza un'adeguata cultura organizzativa orientata alla condivisione e senza pratiche consolidate di aggiornamento e validazione delle informazioni, il rischio è quello di creare archivi sterili, privi di reale valore per i processi decisionali e innovativi.

La fase successiva fa riferimento alla **condivisione e al trasferimento**. Questo processo riguarda la capacità di spostare conoscenza da un individuo, da un gruppo o da un'unità organizzativa a un altro soggetto, in modo che essa possa essere effettivamente compresa, interiorizzata e applicata. A differenza della mera diffusione o distribuzione dell'informazione, il trasferimento implica un livello più profondo: non consiste soltanto nel trasmettere dati o documenti, ma nel garantire che i destinatari siano in grado di **interpretare, contestualizzare e utilizzare** quanto ricevuto.

Il trasferimento della conoscenza si manifesta attraverso diversi canali. Da un lato vi sono i meccanismi **formali e strutturati**, parliamo di paper scientifici, programmi di formazione, manuali, procedure codificate, banche dati e piattaforme digitali. Dall'altro lato, una parte essenziale del trasferimento avviene tramite **interazioni sociali e processi informali**, quali mentoring, affiancamento, narrazione di esperienze (storytelling), comunità di pratica e blockpost. In questo senso, la conoscenza tacita – radicata nelle esperienze e nelle competenze personali – richiede modalità di trasferimento basate sull'osservazione, l'emulazione e la partecipazione diretta ad attività condivise.

Dal punto di vista organizzativo, il trasferimento della conoscenza è essenziale per evitare la dispersione del sapere, ridurre la dipendenza da singoli esperti e promuovere la **continuità operativa**. Inoltre, rappresenta un prerequisito per l'innovazione: la combinazione di conoscenze provenienti da diversi attori consente

di generare nuove idee, soluzioni e pratiche. È proprio questa capacità di attraversare confini organizzativi e disciplinari che trasforma la conoscenza in un vero motore di innovazione: una pratica sviluppata in un reparto può ispirare soluzioni in un altro; un metodo sperimentato in ambito scientifico può trovare applicazioni in contesti educativi o sociali; un dataset originariamente raccolto per finalità amministrative può diventare fonte di nuove analisi per policy maker o ricercatori.

È nella fase dell'applicazione che il sapere, da potenziale latente, si traduce in **valore concreto** per l'organizzazione. Infatti, la conoscenza immagazzinata, trasferita o condivisa non produce benefici effettivi se non viene opportunamente integrata nei processi decisionali, nelle pratiche operative e nelle strategie di innovazione.

L'applicazione della conoscenza si realizza quando essa viene utilizzata per **migliorare l'efficacia delle decisioni**, ottimizzare procedure, risolvere problemi complessi, progettare nuovi prodotti o servizi e, più in generale, per sostenere la capacità organizzativa di adattarsi e competere in contesti mutevoli. In questa prospettiva, la conoscenza applicata diventa un vero e proprio **asset strategico**, poiché orienta l'azione e genera vantaggio competitivo sostenibile.

La difficoltà maggiore risiede nel garantire che la conoscenza disponibile sia effettivamente **integrata nei flussi di lavoro e nei meccanismi organizzativi**. Questo richiede non soltanto strumenti tecnologici che facilitino l'accesso alla conoscenza rilevante, ma anche pratiche di gestione che incoraggino i membri dell'organizzazione a utilizzarla nella quotidianità. Ne consegue che l'applicazione della conoscenza non è un atto meramente tecnico, bensì un processo che implica **commitment, cultura organizzativa e incentivi appropriati**.

È importante sottolineare che la conoscenza applicata non si esaurisce nell'uso immediato, ma contribuisce a un circolo virtuoso di apprendimento organizzativo. L'esperienza derivante dall'applicazione genera infatti nuove conoscenze, che possono essere nuovamente archiviate, trasferite e condivise, alimentando così la memoria organizzativa e la capacità di innovazione continua.

Seguendo il modello DIKW sopra citato, la capacità di utilizzare al meglio la conoscenza per raggiungere gli obiettivi desiderati viene definita saggezza e l'apprendimento della saggezza è definito come il processo di discernimento nei giudizi e nelle azioni basati sulla conoscenza.

In questa ottica, suddividiamo la saggezza in 2 dimensioni: **saggezza individuale**, intesa come competenza ed expertise, e **saggezza collettiva**, intesa come capacità.

La nozione di **competenza** può essere intesa come un requisito standardizzato che consente a un individuo di svolgere in maniera efficace un compito specifico. Essa non si riduce al semplice possesso di conoscenze, ma rappresenta una **combinazione integrata di saperi, abilità e comportamenti**, che si traducono in prestazioni elevate e coerenti con le esigenze del contesto professionale. Le competenze, pertanto, costituiscono un insieme dinamico e multidimensionale, in grado di orientare l'azione individuale verso obiettivi concreti.

Un esempio emblematico è offerto dalla **competenza manageriale**, la quale include non soltanto elementi di natura cognitiva, come il *systems thinking* o l'intelligenza emotiva, ma anche abilità operative quali la capacità di influenzare, di negoziare e di guidare i processi decisionali in contesti complessi. In tal senso, un individuo "possiede" una competenza nella misura in cui le conoscenze, le abilità e le capacità che la costituiscono sono parte integrante del suo bagaglio, consentendogli di agire in maniera efficace in uno specifico ambiente organizzativo.

È interessante osservare che la competenza non coincide con la semplice somma di conoscenze o abilità: essa può venir meno anche senza la perdita di singoli elementi costitutivi. Ciò accade quando mutano i requisiti del contesto lavorativo, rendendo necessaria una nuova combinazione o un diverso utilizzo del sapere posseduto. Da questo punto di vista, la competenza si distingue per il suo carattere intrinsecamente **contestuale e adattivo**, in quanto dipende dalla corrispondenza tra ciò che l'individuo sa e sa fare e ciò che il compito richiede.

In continuità con questo ragionamento, il concetto di **expertise** può essere visto come l'esito della capacità umana di adattarsi agli ambienti fisici e sociali in maniera estesa e raffinata. L'expertise non è soltanto un insieme di competenze, ma la dimostrazione della loro applicazione efficace e reiterata in contesti complessi.

A un livello superiore, il concetto di **capability** amplia ulteriormente la prospettiva, spostandola dalla dimensione individuale a quella organizzativa. La capability non si limita a identificare la capacità di un soggetto di compiere azioni, ma si configura come la facoltà distintiva di un'organizzazione di **mobilitare, integrare e orchestrare risorse eterogenee** – materiali e immateriali – per governare processi complessi. Essa non è dunque una risorsa tra le altre, come il

capitale finanziario, la tecnologia o la forza lavoro, bensì rappresenta il **modo peculiare e superiore** con cui tali risorse vengono allocate e coordinate. Le capability trovano espressione, ad esempio, nella gestione delle relazioni con i clienti, nello sviluppo di nuovi prodotti, nel governo della supply chain, ossia in tutte quelle attività che richiedono continuità, innovazione e coordinamento strategico.

2.6.1 Criticità

All'interno della knowledge value chain articolata nelle 5 fasi sopra descritte, le criticità individuabili non sono meri difetti operativi, ma segnali di un disequilibrio strutturale nel modo in cui la conoscenza viene oggi prodotta e governata. La prima frattura riguarda soprattutto la fase di creazione: il sistema si fonda su una marcata asimmetria tra chi genera contenuti (ricercatori, istituzioni, professionisti, comunità) e chi li riceve in modo passivo. L'ownership – sia giuridica sia “di fatto” – dei risultati è spesso concentrata in pochi nodi della filiera (grandi istituzioni, editori, piattaforme), con contratti e regole d'uso poco trasparenti per gli stessi autori. Ciò produce almeno due effetti: da un lato riduce gli incentivi a una condivisione aperta, perché il creatore percepisce di perdere controllo senza ricevere un ritorno proporzionato; dall'altro restringe il numero di attori coinvolti alimentando una partecipazione selettiva e, in molti casi, elitista. La fase di creazione diventa quindi meno pluralista e meno rappresentativa della varietà di bisogni, problemi e prospettive presenti nella società.

Queste distorsioni si traslano nella fase di **validazione scientifica**, che risulta “sterile” non tanto per mancanza di rigore, quanto per la difficoltà di far dialogare validità tecnica e adozione reale. I meccanismi tradizionali di peer review, centrati su un numero limitato di revisori anonimi, sono spesso opachi: criteri di valutazione impliciti, tempi lunghi, asimmetrie informative tra autore e revisore, conflitti di interesse difficilmente rilevabili. Questo sistema tende a privilegiare contenuti che si conformano agli standard dominanti (disciplinari, metodologici, linguistici), penalizzando sperimentazioni interdisciplinari o approcci non convenzionali. Inoltre, la distanza tra i contesti in cui la conoscenza viene prodotta e quelli in cui dovrebbe essere applicata fa sì che risultati tecnicamente solidi restino confinati in nicchie accademiche, senza tradursi in innovazioni operative. La validazione, così concepita, certifica la “correttezza” interna di un lavoro ma non ne favorisce l'integrazione in ecosistemi più ampi, finendo per sterilizzarne il potenziale trasformativo.

L'attuale modello di finanziamento della ricerca scientifica si basa sulla presentazione di proposte progettuali da parte di singoli ricercatori o gruppi di ricerca a specifiche agenzie erogatrici. La valutazione di tali proposte è affidata a un numero ristretto di revisori esperti, incaricati di esaminare la documentazione, intervistare i candidati e selezionare solo una piccola parte delle richieste. Sebbene ampiamente adottato, questo sistema presenta limiti significativi: esso genera colli di bottiglia procedurali che comportano lunghi intervalli di tempo tra la presentazione della domanda e l'effettiva erogazione dei fondi, ed è riconosciuto come suscettibile a bias cognitivi, conflitti di interesse e dinamiche politiche interne ai comitati di revisione.

Numerosi studi hanno evidenziato come tali commissioni faticino a identificare con coerenza le proposte di maggiore qualità: la stessa proposta, valutata da gruppi differenti, tende infatti a produrre esiti divergenti. L'aumento della competizione per fondi sempre più scarsi ha inoltre determinato una loro concentrazione nelle mani di ricercatori senior, spesso portatori di progetti più conservativi sul piano intellettuale. Questa dinamica ha contribuito a creare un ecosistema altamente competitivo, caratterizzato da incentivi distorti che limitano la sperimentazione e frenano l'innovazione scientifica.

Se determinare il grado di coerenza di un progetto con la missione dell'organizzazione è un'operazione relativamente immediata, risulta molto più complesso valutare il valore intrinseco della conoscenza scientifica prodotta da un determinato programma di ricerca. La questione alla base di questo problema può essere sintetizzata nella domanda: *come si valuta oggettivamente la qualità del lavoro di un ricercatore?* Si consideri, ad esempio, un finanziatore con un budget di un milione di dollari destinato allo studio della gravità quantistica, incaricato di scegliere tra due candidati. Quali criteri permetterebbero di prevedere in modo affidabile quale dei due laboratori produrrà il maggiore ritorno scientifico?

Nella pratica, i finanziatori si affidano da decenni alla bibliometria come guida decisionale. Per stimare la probabilità che un progetto generi ritorni scientifici adeguati, vengono analizzati principalmente due indicatori: la produttività, intesa come numero di pubblicazioni realizzate dal ricercatore, e l'impatto, misurato attraverso il numero di citazioni generate dalle sue opere o, più frequentemente, tramite l'*impact factor* delle riviste accademiche in cui i lavori sono pubblicati. Quest'ultimo rappresenta una metrica sintetica della rilevanza di una rivista, calcolata sulla base della frequenza con cui essa è citata nel biennio precedente alla pubblicazione.

Tuttavia, un corpus crescente di studi dimostra l'incapacità di tali strumenti di selezionare in modo affidabile i migliori beneficiari di finanziamenti. Una ricerca condotta nel 2017 ha evidenziato, ad esempio, una significativa eterogeneità nei giudizi dei revisori del National Institutes of Health, sia nella valutazione qualitativa sia in quella quantitativa delle domande esaminate. L'adozione pervasiva di metriche bibliometriche ha finito per modellare il sistema degli incentivi in modo tale da premiare non necessariamente la qualità o l'innovatività dei risultati, bensì la capacità di produrre un elevato numero di pubblicazioni e di collocarle su riviste a elevato fattore di impatto. In questo scenario, il successo accademico viene sempre più spesso misurato in base alla visibilità editoriale anziché al contributo scientifico sostanziale, consolidando un ambiente ipercompetitivo sintetizzato dalla nota espressione *publish or perish*, che descrive la crescente pressione sui ricercatori a pubblicare con continuità per mantenere accesso a risorse e opportunità di carriera.

La fase di **archiviazione** rappresenta un nodo critico della knowledge value chain, poiché incide direttamente sulla capacità del sistema di preservare, rendere intelligibile e successivamente riutilizzare la conoscenza prodotta. Nonostante l'ampia disponibilità di infrastrutture digitali, il processo attuale è caratterizzato da un rischio strutturale di "scomparsa" della conoscenza, una scomparsa non necessariamente fisica ma funzionale: il contenuto esiste, ma non è più accessibile, interpretabile o verificabile in maniera efficace. Questo fenomeno può manifestarsi attraverso differenti meccanismi.

In primo luogo, **la natura iperspecialistica degli archivi e dei formati adottati** crea barriere di comprensione significative. I repository disciplinari adottano spesso linguaggi tecnici, strutture dati proprietarie o metadati incompleti, che rendono complessa l'interpretazione dei materiali da parte di ricercatori esterni alla comunità di riferimento. Di conseguenza, anche informazioni teoricamente pubbliche risultano di fatto inaccessibili a causa della mancanza di standardizzazione semantica e documentale. Tale frammentazione ostacola non solo la circolazione inter-disciplinare della conoscenza, ma anche la capacità delle future generazioni di ricostruire i contesti metodologici e analitici necessari per interpretare correttamente dati e risultati.

In secondo luogo, **la scarsa verificabilità dei contenuti archiviati** costituisce un ulteriore elemento di vulnerabilità. Molti archivi non impongono requisiti rigorosi circa la disponibilità di dataset grezzi, codici, workflow sperimentali e versioni intermedie dei modelli analitici utilizzati. Senza tali componenti, la replicabilità – pilastro fondamentale della scienza – diventa difficilmente

perseguibile. Il risultato è che una parte significativa della conoscenza nominalmente archiviata si trasforma in un artefatto opaco: consultabile, ma non realmente verificabile né riutilizzabile. A ciò si aggiunge la mancanza di meccanismi chiari di versionamento e tracciabilità, che rende complesso verificare l'evoluzione dei contenuti nel tempo e individuare eventuali errori o modifiche rilevanti.

Un ulteriore fattore di rischio deriva dall'obsolescenza dei formati digitali – spesso sottovalutata – rappresenta un problema: contenuti archiviati in formati non aggiornati o privi di adeguata documentazione rischiano di diventare illeggibili nel giro di pochi anni. In questo senso, la scomparsa della conoscenza assume la forma di una lenta erosione, in cui porzioni di sapere sopravvivono solo nominalmente, senza poter essere realmente recuperate.

Tutte queste rigidità si traducono in una lentezza strutturale che emerge dall'interazione di diversi fattori istituzionali, economici e tecnologici che, nel loro insieme, trasformano la circolazione della conoscenza in un processo sequenziale, frammentato e spesso incompatibile con i ritmi di innovazione richiesti dalla società contemporanea.

Il primo elemento di rallentamento riguarda i **tempi editoriali**, che costituiscono uno dei colli di bottiglia più evidenti. Tra la sottomissione di un articolo e la sua pubblicazione possono trascorrere mesi o, in molti casi, anni, a causa di cicli di peer review ripetuti, revisioni multiple e lenti processi di gestione da parte delle riviste accademiche. Questo ritardo non è soltanto amministrativo: riflette un modello curatoriale che privilegia la stabilità e la reputazione rispetto alla rapidità, mantenendo la distribuzione della conoscenza subordinata ai tempi e alle priorità degli editori piuttosto che a quelli della comunità scientifica o degli utilizzatori finali.

Un secondo fattore determinante è rappresentato dalle **barriere economiche e di accesso**, come paywall e licenze proprietarie, che rallentano la circolazione poiché limitano il numero di attori in grado di accedere immediatamente ai risultati. Anche quando un contenuto è pubblicato, la sua distribuzione rimane spesso confinata a istituzioni accademiche o soggetti dotati delle risorse necessarie per sostenere costi elevati di abbonamento. Ne deriva un flusso informativo non continuo, ma selettivo, che dipende dalla capacità economica degli attori, con un impatto visibile sulla tempestività della diffusione.

A questo si aggiunge la **frammentazione delle infrastrutture di distribuzione**, che impedisce un accesso rapido, integrato e interoperabile ai contenuti. La conoscenza è dispersa tra riviste, database disciplinari, piattaforme

istituzionali e archivi proprietari che difficilmente dialogano tra loro. L'assenza di standard condivisi di metadattazione, indicizzazione e interoperabilità rende la ricerca di informazioni un processo laborioso, che richiede tempo e competenze avanzate. Di fatto, la lentezza non deriva solo dai tempi di pubblicazione, ma dal costo cognitivo necessario per rintracciare, filtrare e collegare informazioni distribuite in un ecosistema eterogeneo. Tutto questo si riverbera sulla fase di applicazione che rappresenta il punto in cui la conoscenza dovrebbe tradursi in valore sociale, economico o tecnologico: ciò che arriva tardi rischia di arrivare già obsoleto. In settori caratterizzati da rapida evoluzione – come le scienze computazionali, la biotecnologia, l'intelligenza artificiale, le politiche pubbliche o la gestione delle emergenze – il ritardo nella circolazione della conoscenza può tradursi in inefficienze economiche, errori decisionali o perdita di opportunità strategiche. La lentezza, dunque, non è un semplice inconveniente: è un limite sistemico che riduce la capacità della conoscenza di avere un impatto tempestivo e significativo.

Capitolo 3

Presentazione dei dati

3.1 Metodologia

La metodologia adottata in questa tesi è progettata per analizzare in modo rigoroso l'ecosistema della Decentralized Science (DeSci) e rispondere a due domande di ricerca: (RQ1) comprendere come l'adozione della tecnologia blockchain influenzi, da un punto di vista qualitativo, il processo di creazione della conoscenza; (RQ2) valutare il grado di decentralizzazione effettivamente raggiungibile mediante tale tecnologia. Considerata la natura emergente del dominio e l'assenza di dati storici consolidati, l'impianto metodologico combina un'analisi qualitativa di tipo esplorativo con una successiva fase quantitativa orientata alla misurazione.

In primo luogo, per indirizzare la RQ1, viene condotta una revisione strutturata della letteratura con l'obiettivo di definire in modo univoco i costrutti tecnologici rilevanti — blockchain, tokenomics e smart contract — e di ricostruire la value chain attuale del processo di creazione della conoscenza.

Su questa base teorica, l'esplorazione dell'attuale ecosistema della **DeSci** ha reso possibile l'individuazione delle piattaforme attualmente attive, che sono state successivamente mappate attraverso un *flowchart* illustrato nel Capitolo 3.2. Questo *flowchart* ha svolto un ruolo cruciale nell'analisi, permettendo di rappresentare visivamente l'intero ecosistema e di categorizzare le piattaforme in base a diverse variabili. In particolare, la classificazione ha seguito tre principali parametri: il **layer di riferimento**, che distingue tra **base layer**, **protocol layer** e **application layer**; l'**ampiezza dell'azione**, che considera la capacità di una piattaforma di operare su uno o più layer contemporaneamente; e la **tipologia di applicativi abilitati**, distinguendo tra piattaforme focalizzate sul **knowledge layer** e quelle orientate al **research layer**.

L'esito di tale classificazione è quindi la costruzione di un flowchart di processo che formalizza la riconfigurazione del processo di creazione della conoscenza indotta dalla presenza della blockchain. Il flowchart viene poi utilizzato come artefatto analitico per derivare una formalizzazione dell'impatto qualitativo della

tecnologia sulla value chain: a partire dalle criticità del 2.6.1 e dalle proprietà intrinseche della tecnologia, vengono identificati, per ciascuna criticità, gli outcome abilitati dalla blockchain, interpretati come soluzioni plausibili e discussi nel 4.1.

Per la RQ2, l'approccio viene esteso con una componente quantitativa: ogni progetto incluso nel flowchart è valutato mediante il calcolo di un indice di centralizzazione e un indice di decentralizzazione, finalizzato a rendere confrontabili implementazioni eterogenee.

In generale, la valutazione del grado di decentralizzazione di un ecosistema complesso, in particolare nel contesto delle piattaforme digitali e dei sistemi basati su token, richiede un approccio formale in grado di catturare non solo la struttura statica del sistema, ma soprattutto le dinamiche operative che regolano le interazioni tra gli attori coinvolti. In tale prospettiva, l'analisi proposta nel presente lavoro si fonda sull'utilizzo di strumenti di *network analysis* e teoria dei grafi, applicati al cosiddetto *actors mapping*, ovvero la rappresentazione esplicita degli stakeholder dell'ecosistema e delle relazioni funzionali che intercorrono tra di essi. Ciascun attore viene modellato come un nodo del grafo, mentre le relazioni operative sono descritte attraverso le *elementary cooperations*, intese come interazioni bilaterali riconducibili a una dinamica di tipo principal-agent. Questa formalizzazione consente di tradurre i processi decisionali e operativi del sistema in una struttura matematica analizzabile, nella quale la complessità del coordinamento emerge dalla combinazione delle interazioni elementari.

Il quadro analitico adottato si fonda sull'utilizzo congiunto di due indicatori complementari: l'indice di centralità del grafo C_x , derivato dalla teoria delle reti sociali, e l'indice di decentralizzazione D_x , introdotto come proxy del grado di cooperazione tra gli attori del sistema. L'impiego simultaneo di tali metriche consente di cogliere sia la distribuzione del potere strutturale all'interno della rete, sia il livello di interazione effettiva tra i nodi.

L'indice di centralità C_x è calcolato secondo la formulazione proposta da Freeman (1979) e misura il grado in cui la centralità di un nodo dominante eccede quella degli altri nodi del grafo. Formalmente, esso è definito come:

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^n [C_x(p^*) - C_x(p_i)]}{H}$$

dove $C_x(p_i)$ rappresenta la centralità del nodo i , $C_x(p^*)$ è il valore massimo di centralità osservato nella rete, n è il numero totale di nodi e $H = (n - 1)^2$ è il fattore di normalizzazione che garantisce valori compresi nell'intervallo $[0, 1]$. L'indice quantifica dunque la disuguaglianza strutturale della rete: un valore nullo indica una distribuzione perfettamente uniforme delle relazioni, mentre un valore unitario identifica una configurazione estrema in cui un solo nodo concentra la totalità della centralità. È importante sottolineare che alcune combinazioni di D_x e C_x restano irraggiungibili, ad esempio la combinazione $D_x = 0$ e $C_x = 1$ non è mai realizzabile per alcun n finito, poiché la centralizzazione richiede necessariamente almeno una relazione attiva.

È inoltre possibile distinguere tra *indegree centrality* e *outdegree centrality*, a seconda che si considerino rispettivamente le interazioni entranti o uscenti, evidenziando come la centralizzazione possa variare in funzione del punto di vista adottato sull'orientamento delle relazioni.

Parallelamente, l'indice di decentralizzazione D_x viene definito come il rapporto tra il numero di *elementary cooperations* effettivamente presenti nel sistema e il numero massimo teoricamente possibile, dato il numero di attori coinvolti. In termini formali:

$$D_x = \frac{\text{Numero di cooperazioni esistenti}}{\text{Numero massimo di cooperazioni}}$$

dove il numero massimo di cooperazioni è pari a $N(N - 1)$, assumendo che ogni attore possa potenzialmente instaurare una relazione diretta con tutti gli altri. Questo indicatore fornisce una misura della densità operativa della rete e del livello di cooperazione complessiva tra gli attori, interpretata come espressione del grado di decentralizzazione funzionale del sistema. Un valore di $D_x = 1$ corrisponde a una configurazione completamente cooperativa, nella quale tutte le interazioni possibili sono attive.

L'uso combinato di C_x e D_x consente di superare una visione puramente dicotomica tra centralizzazione e decentralizzazione, mostrando come un sistema possa presentare simultaneamente un'elevata densità di interazioni e, al contempo, una struttura ancora parzialmente centralizzata. In particolare, mentre D_x cattura la quantità di cooperazione presente, C_x descrive come tale cooperazione sia

distribuita tra gli attori. L'analisi congiunta dei due indicatori evidenzia quindi come centralizzazione e decentralizzazione non costituiscano grandezze perfettamente speculari né mutuamente esclusive. Al contrario, esse possono coesistere in configurazioni ibride, nelle quali un elevato grado di cooperazione si accompagna alla persistenza di nodi con maggiore rilevanza strutturale. In questo senso, l'aumento del numero di interazioni all'interno della rete tende, in media, a ridurre l'indice di centralità e ad accrescere il grado di decentralizzazione, ma tale relazione non risulta lineare né univoca. La struttura complessiva del sistema dipende infatti non solo dalla quantità delle relazioni, ma anche dalla loro distribuzione e direzionalità. Ne consegue che il percorso evolutivo che conduce da una configurazione centralizzata a una pienamente decentralizzata è fortemente influenzato dalla natura delle interazioni tra gli attori e dai ruoli funzionali che essi assumono nel tempo.

Questa osservazione assume particolare rilevanza nel caso delle Decentralized Autonomous Organizations (DAO), nelle quali la condizione ideale di decentralizzazione corrisponde a una configurazione in cui nessun attore risulta indispensabile e tutti contribuiscono in modo fungibile al funzionamento del sistema ($D_x = 1$ e $C_x = 0$). In tale scenario limite, la centralità tende ad annullarsi e il grado di cooperazione raggiunge il valore massimo, garantendo elevata resilienza e robustezza strutturale. Tuttavia, nei sistemi reali, la presenza di vincoli tecnici, economici e organizzativi rende frequente l'emergere di assetti intermedi, nei quali la decentralizzazione è il risultato di un equilibrio dinamico tra cooperazione diffusa e concentrazione funzionale. L'approccio basato su *actors mapping* e metriche di rete si configura pertanto come uno strumento analitico efficace per comprendere e progettare tali equilibri, offrendo una base quantitativa per lo studio dei processi di coordinamento e della produzione della conoscenza all'interno di ecosistemi complessi.

Nel quadro metodologico della ricerca, la costruzione della **regione ammissibile** nel piano delle coordinate ($D_x ; C_x$) rappresenta un passaggio centrale dell'analisi. Più precisamente, è stato costruito lo spazio delle configurazioni possibili ($D_x ; C_x$) fissando un numero N di attori, corrispondente al numero di nodi del grafo.

A partire da questo valore, sono state considerate **tutte le possibili configurazioni relazionali tra i nodi**, ossia tutte le possibili combinazioni di archi che coinvolgono gli attori della rete. In termini formali, ogni configurazione corrisponde a una diversa **matrice di adiacenza** del grafo, che descrive quali relazioni siano presenti tra gli attori. Per ciascuna di queste configurazioni è stato

quindi calcolato il valore dei due indici D_x e C_x , ottenendo una specifica coppia di coordinate nel piano cartesiano. L'insieme di tutte le coppie $(D_x ; C_x)$ derivanti da tutte le configurazioni topologiche possibili costituisce ciò che in questo lavoro viene definito **regione ammissibile**.

È importante sottolineare che tale regione non rappresenta uno spazio continuo di valori teoricamente possibili, ma piuttosto l'insieme discreto delle combinazioni effettivamente generabili dalla struttura del grafo. Ogni punto della regione corrisponde infatti a una specifica configurazione relazionale tra gli attori della piattaforma. Questo implica che, dato un certo numero N di attori, non tutte le coppie di valori $(D_x ; C_x)$ sono realizzabili: solo quelle compatibili con una determinata topologia del grafo possono emergere dall'analisi. La regione ammissibile rappresenta quindi, in senso stretto, lo **spazio delle configurazioni strutturalmente possibili** per reti composte da N attori.

Un ulteriore aspetto metodologico rilevante riguarda il fatto che, per un medesimo valore di decentralizzazione D_x , possono emergere più valori di centralizzazione C_x . Questo dipende dal fatto che differenti configurazioni relazionali possono produrre lo stesso livello complessivo di distribuzione delle interazioni tra gli attori, pur presentando strutture interne diverse in termini di concentrazione della centralità. In altre parole, reti con un analogo grado di decentralizzazione possono differire significativamente per il modo in cui le relazioni risultano distribuite e per il ruolo strutturale assunto dai singoli nodi.

Infine, si evidenzia che la forma della regione ammissibile dipende direttamente dalla dimensione del grafo, ossia dal numero di attori N . All'aumentare di N , il numero delle configurazioni topologiche possibili cresce rapidamente, determinando un aumento significativo delle combinazioni $(D_x ; C_x)$ osservabili. Di conseguenza, la distribuzione dei punti nel piano tende a diventare progressivamente più densa, fino ad assumere visivamente una forma che si avvicina a una superficie continua. Tuttavia, anche in questi casi la regione rimane formalmente costituita da un insieme discreto di punti, ciascuno dei quali rappresenta una specifica struttura relazionale del grafo. Questa proprietà è fondamentale per l'interpretazione empirica dei risultati, poiché consente di collocare le piattaforme analizzate all'interno dello spazio delle configurazioni strutturalmente possibili per reti di dimensione comparabile.

3.2 Flowchart

Nel tentativo di offrire una rappresentazione organica dell'attuale ecosistema della *Decentralized Science* (DeSci), il flowchart proposto adotta una struttura multilivello che consente di distinguere le diverse componenti tecnologiche e funzionali che ne caratterizzano l'architettura.

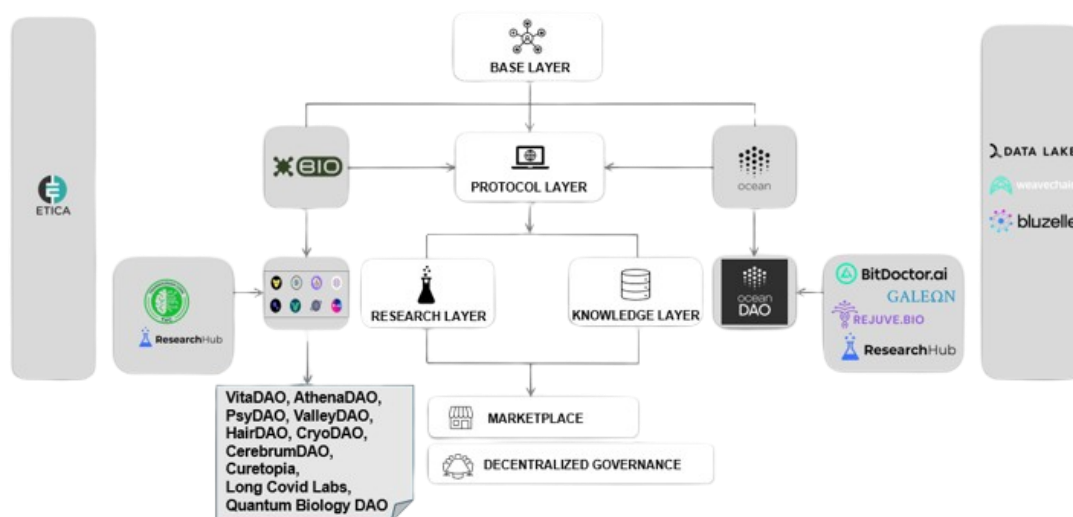


Figura 3.1 – Decentralized Science Ecosystem

Alla base del sistema è collocato il Base Layer, corrispondente alle infrastrutture blockchain – come Ethereum, Solana o Polygon – che forniscono il substrato tecnologico necessario per garantire sicurezza, immutabilità e coordinamento decentralizzato. Su questo livello si innesta il Protocol Layer, nel quale operano quei protocolli che definiscono standard, regole di interoperabilità e meccanismi condivisi per la gestione degli asset, dei diritti e delle transazioni.

L'ultimo livello, quello **applicativo**, è articolato in due sotto-layer distinti, che riflettono le diverse modalità attraverso cui la decentralizzazione può incidere sulla produzione e sulla gestione della conoscenza scientifica. Il **Research Layer** include i progetti che concentrano la propria attività sul finanziamento, sulla governance e sulla conduzione di veri e propri programmi di ricerca, con particolare attenzione all'ambito biotecnologico e biomedico. Qui la blockchain funge prevalentemente da infrastruttura di coordinamento e da strumento per abilitare modelli di finanziamento collettivo, proprietà condivisa e gestione trasparente dei risultati scientifici.

A esso si affianca il **Knowledge Layer**, che comprende invece i progetti orientati alla circolazione, valorizzazione e scambio dei dati scientifici. In questo

contesto, il termine *knowledge* è utilizzato in senso operativo come sinonimo di dato, in quanto ciò che viene prodotto, trasferito e reso disponibile attraverso questi sistemi è l'unità informativa elementare. I progetti collocati in questo layer assumono quindi la forma di veri e propri marketplace decentralizzati di dati, nei quali la blockchain svolge un ruolo cruciale nel garantire tracciabilità, verificabilità e incentivi economici coerenti con la partecipazione degli attori.

Questa distinzione permette di evidenziare come l'ecosistema della DeSci non sia un blocco omogeneo, ma un insieme articolato di livelli complementari che cooperano nel riformulare sia la produzione della ricerca sia la gestione e la diffusione dei dati scientifici.

All'interno del flowchart, i progetti che popolano l'ecosistema della *DeSci* sono collocati in modo da rifletterne la struttura tecnologica e organizzativa, evidenziando come ciascun attore occupi posizioni differenti lungo i tre livelli individuati. Una prima categoria è costituita dalle **blockchain native**, quali Etica, Bluzelle, DataLake o WeaveChain. In quanto vere e proprie infrastrutture distribuite progettate per gestire, verificare e coordinare flussi informativi, queste piattaforme ricoprono simultaneamente il **Base Layer**, il **Protocol Layer** e l'**Application Layer**. La loro peculiarità risiede nel fatto che la blockchain, oltre a fungere da livello di consenso e sicurezza, incorpora nativamente le logiche di governance e di scambio dei dati, configurandosi come un sistema autosufficiente che ingloba al proprio interno sia gli standard operativi sia le applicazioni che ne fanno uso.

Accanto alle blockchain vere e proprie, una seconda categoria è rappresentata dai **protocolli specializzati**, come *Ocean Protocol* o *Bio Protocol*, che svolgono una funzione di standardizzazione dell'ecosistema sovrastante. L'adesione a tali protocolli non è meramente tecnica, ma strategica: consente ai progetti partecipanti di integrare meccanismi di interoperabilità, tracciabilità e coordinamento economico che sarebbero difficili da implementare autonomamente. In altre parole, un protocollo definisce il linguaggio comune – in termini di formati dei dati, condizioni di accesso, modelli di incentivazione e regole di governance – che permette ai diversi attori di operare all'interno di un medesimo quadro condiviso. L'utilizzo di un protocollo comune riduce le asimmetrie informative e amplifica il valore di rete dell'intero ecosistema, creando un contesto in cui i contributi dei singoli progetti diventano interoperabili e cumulativi.

Infine, al livello applicativo si colloca una pluralità di **progetti e piattaforme**, che possono operare secondo due modalità distinte. Da un lato, vi sono applicazioni che si **appoggiano a protocolli esterni** come quelli sopra citati, sfruttando gli

standard e le infrastrutture economico-tecniche già disponibili per gestire diritti d'uso, proprietà dei dati, flussi di pagamento e meccanismi di reputazione. Dall'altro lato, esistono piattaforme che implementano un **protocollo economico proprietario**, espresso attraverso smart contract che regolano in modo autonomo la governance interna, le logiche di scambio, i modelli di incentivazione e le modalità di interazione con gli utenti. In entrambi i casi, l'Application Layer rappresenta il punto di contatto diretto con gli utilizzatori e costituisce il livello in cui la tecnologia blockchain si traduce in servizi concreti per la gestione della ricerca, dei dati e dei processi scientifici.

Un esempio emblematico di applicazione che si appoggia a un protocollo esterno, come riportato nel flowchart, è rappresentato dalle **BioDAOs**, ovvero organizzazioni autonome decentralizzate orientate al finanziamento, alla governance e allo sviluppo di progetti di ricerca biotecnologica e biomedica. Tra le più note si annoverano *VitaDAO*, *AthenaDAO*, *HairDAO* e *PsyDAO*, ciascuna focalizzata su un ambito specifico — rispettivamente longevità, salute femminile, alopecia e psichedelici terapeutici — ma accomunate dal medesimo modello organizzativo. Le BioDAOs operano come comunità distribuite di ricercatori, investitori, pazienti e appassionati che, attraverso la detenzione del token di governance, partecipano collettivamente alla selezione, valutazione e gestione delle iniziative scientifiche.

Le BioDAOs si configurano dunque come **applicativi decentralizzati ad alto grado di specializzazione**, il cui funzionamento non si limita alla gestione interna dei fondi, ma richiede uno strato sottostante capace di standardizzare le modalità con cui la proprietà intellettuale, i diritti d'uso, i flussi di capitale e i dati scientifici vengono gestiti. In questo quadro, esse trovano un naturale punto di appoggio in **Bio Protocol**, il protocollo progettato per fornire standard interoperabili per la tokenizzazione della proprietà intellettuale, per la definizione dei diritti di governance e per la strutturazione dei processi di finanziamento e trasferimento tecnologico.

In questo senso, le BioDAOs rappresentano un caso paradigmatico di applicativi che, pur operando in autonomia, **si appoggiano a un protocollo sottostante** per garantire solidità, scalabilità e interoperabilità alle proprie operazioni. Ciò conferma la logica multilayer adottata nel flowchart: le applicazioni sono rese possibili dagli standard protocollari che ne definiscono le regole operative e la capacità di integrarsi in un ecosistema più vasto.

All'interno dell'Application Layer, articolato nei due sotto-livelli del **Research Layer** e del **Knowledge Layer**, emergono ulteriori specializzazioni funzionali che

permettono di comprendere meglio la natura operativa dei progetti. In particolare, l'Application Layer può essere suddiviso in due grandi sottocategorie: **decentralized governance** e **marketplace**. Questa distinzione riflette le due principali modalità attraverso cui le applicazioni sfruttano la tecnologia blockchain: da un lato, per strutturare forme di governance distribuita basate su token e smart contract; dall'altro, per facilitare lo scambio, la valorizzazione e la circolazione di dati o risultati scientifici attraverso mercati digitali.

In linea generale, consideriamo tutti i progetti dell'Application Layer come detentori o di un marketplace o di una decentralized governance o di entrambi; nel caso del **Knowledge Layer**, tale distinzione assume però un significato specifico. Poiché questi progetti operano come infrastrutture per la gestione e la monetizzazione dei dati, il **marketplace** rappresenta il loro fulcro funzionale. Di conseguenza, tutti i progetti collocati in questo layer includono necessariamente un meccanismo di mercato, che permette di acquistare, vendere o mettere in stake asset informativi. Tuttavia, la presenza di un **modello di governance decentralizzata** non è altrettanto uniforme. Se alcuni progetti adottano forme di governance completamente distribuite, fondate su DAO e meccanismi di voto on-chain, altri scelgono strutture più ibride o parzialmente centralizzate.

Esempi significativi sono **Bluzelle, DataLake, WeaveChain e Rejuve.ai**, che, pur operando come marketplace tecnologicamente avanzati, mantengono una gestione ancora in parte centralizzata, affidata ai team operativi o alle entità aziendali che supervisionano lo sviluppo della piattaforma. In questi casi, la decentralizzazione riguarda principalmente la dimensione tecnica — come la distribuzione dei dati, la verifica crittografica o l'uso di token — mentre le decisioni strategiche o di governance rimangono prerogativa di un nucleo ristretto di operatori. Ciò riflette una fase di transizione tipica dei progetti data-centric: la complessità dell'infrastruttura e la necessità di garantire affidabilità operativa portano spesso a mantenere un controllo più diretto, rinviando una piena decentralizzazione a fasi successive del ciclo di vita del protocollo.

Questa osservazione consente di cogliere una sfumatura importante: **l'appartenenza all'ecosistema DeSci non implica automaticamente una governance decentralizzata**, ma piuttosto una distribuzione variabile del grado di decentralizzazione in funzione delle esigenze tecnologiche, operative ed economiche dei singoli progetti. Nel Knowledge Layer, il marketplace rappresenta l'elemento imprescindibile, mentre la governance decentralizzata costituisce una dimensione complementare, adottata con intensità differente a seconda del modello organizzativo e della maturità del progetto.

Sebbene tutti i progetti collocati nel **Knowledge Layer** possiedano un marketplace, è necessario precisare che il termine *marketplace* non va interpretato esclusivamente in senso tradizionale. In economia digitale, un marketplace rappresenta tipicamente **un’infrastruttura che facilita l’incontro tra domanda e offerta di un bene o servizio**, permettendo transazioni dirette tra attori eterogenei attraverso regole condivise, meccanismi di pricing e strumenti di scambio. Tuttavia, quando il bene in questione è costituito da informazioni ad alta sensibilità — come dati clinici, biologici o identitari — la logica del marketplace non può coincidere con quella di un mercato aperto e trasferibile di asset informativi.

Nell’ecosistema DeSci, la maggior parte dei progetti adotta una forma di mercato profondamente diversa, fondata su principi di **minimizzazione del trasferimento dei dati**, tutela della privacy e utilizzo controllato delle informazioni. Di conseguenza, ciò che viene effettivamente scambiato non è il dato in sé, bensì **un diritto d’uso condizionato**, definito da smart contract che ne regolano le modalità, i limiti e le finalità consentite. L’acquirente non ottiene la proprietà del dato né una copia trasferibile, ma piuttosto il consenso a impiegarlo entro i confini specificati dal contratto digitale, assicurando così la protezione dell’identità e della sovranità informativa del soggetto a cui il dato appartiene.

In altri casi, il marketplace opera secondo logiche ancora più restrittive: l’utente non acquista il dato, né un accesso diretto ad esso, ma **la possibilità di inviare una query** — ovvero una richiesta computazionale — che viene eseguita all’interno di un ambiente sicuro (vault) dove i dati rimangono criptati o comunque non esposti. Il sistema elabora la richiesta in situ, mantenendo il dato immobile all’interno della sua enclave protetta, e restituisce esclusivamente il risultato autorizzato, evitando qualsiasi forma di estrazione o ricostruzione del contenuto informativo originario. Tale modello, spesso basato su tecniche come secure enclaves, federated computation o crittografia omomorfa parziale, consente di coniugare l’esistenza di un mercato funzionale con la necessità imprescindibile di garantire privacy, conformità normativa e integrità computazionale.

In questo senso, il marketplace del Knowledge Layer non va inteso come uno spazio di compravendita diretta di dati, ma come una **piattaforma di orchestrazione degli accessi**, che gestisce autorizzazioni, traccia l’utilizzo, assicura verificabilità delle operazioni e coordina flussi informativi altamente regolamentati. La componente economica è quindi orientata non alla commercializzazione del dato, bensì alla valorizzazione del suo utilizzo controllato e alla remunerazione degli attori che ne permettono l’impiego in modo sicuro e conforme. Tale struttura ibrida rappresenta una delle principali innovazioni

apportate dalla DeSci nella gestione dei dati sensibili, ridefinendo il concetto stesso di scambio informativo in un contesto decentralizzato.

Capitolo 4

Risultati qualitativi

4.1 Soluzioni blockchain-based

Al fine di mappare l'impatto qualitativo della tecnologia blockchain sul processo di produzione della conoscenza, l'analisi successiva prende le mosse dalle principali criticità spiegate nel 2.6.1 che caratterizzano l'attuale knowledge value chain, ovvero asimmetria informativa, validazione sterile, rischio di scomparsa dei contributi e lentezza nella circolazione dei risultati. Ciascuna di queste criticità viene progressivamente "levigata" dall'introduzione di soluzioni blockchain-based, che mirano a generare specifici outcome che approfondiamo di seguito.

INTRODUZIONE DI ATTORI NON TRADIZIONALI: La blockchain consente a cittadini, pazienti, imprese e comunità di ricerca di contribuire direttamente attraverso fondi, dati, modelli e risorse computazionali, ampliando la platea dei soggetti riconosciuti come autori e co-produttori. Questo nuovo approccio ha la finalità di evitare che la creazione della conoscenza rimanga chiusa dentro silos disciplinari e organizzativi ma che possa essere aperta, partecipata e orientata ai bisogni reali, riducendo la forte asimmetria che si genera quando qualcuno produce e qualcun altro riceve passivamente.

Si cerca di migliorare la capacità di intercettare segnali che altrimenti resterebbero invisibili. Ad esempio, un cittadino può far emergere un bisogno sociale o ambientale che non sarebbe mai comparso nei dati di mercato o nei report ufficiali. La base informativa si allarga, diventa più diversificata e più vicina ai bisogni reali del territorio.

Entra in gioco un approccio partecipativo e co-creativo, in cui la definizione del problema non è calata dall'alto ma costruita insieme agli stakeholder.

Il presupposto da cui si parte è che la conoscenza scientifica debba essere considerata un bene pubblico e che i processi di ricerca debbano essere accessibili e verificabili. Attraverso la decentralizzazione dei meccanismi di finanziamento, degli strumenti scientifici e dei canali di comunicazione, la DeSci mira a creare un

ambiente in cui idee innovative e non convenzionali possano emergere e svilupparsi senza ostacoli strutturali.

In questa cornice concettuale si collocano modelli alternativi per la selezione e il finanziamento della ricerca basati sulla partecipazione diretta della comunità: prendendo come punto di riferimento il modello sviluppato da BIO Protocol andiamo ad analizzare come questo avviene.

1. Selezione dei progetti

- I possessori del token BIO partecipano attivamente al processo di selezione dei nuovi progetti da includere nell'ecosistema, adottando un approccio bottom-up nell'ambito della valutazione scientifica e dell'allocazione delle risorse.
- I progetti approvati dalla comunità possono successivamente accedere a forme di finanziamento, essere integrati nel tesoro del protocollo e beneficiare del supporto della rete.
- Poiché il buon funzionamento del protocollo dipende dalla qualità dei progetti selezionati, la partecipazione al processo richiede lo staking dei token BIO, garantendo che gli attori coinvolti siano interessati al successo a lungo termine dell'ecosistema.

2. Finanziamento

- Una volta approvato, ogni progetto consente ai titolari di token BIO vincolati in staking di partecipare alla sua vendita iniziale.
- Attraverso questo meccanismo, gli utenti possono sostenere iniziative scientifiche innovative sin dalle fasi più preliminari, con condizioni competitive rispetto a quelle riservate a investitori istituzionali o venture capital.
- Per i progetti, il modello offre l'opportunità di costruire fin dall'inizio una comunità scientifica qualificata e coinvolta — spesso formata da ricercatori o da pazienti direttamente interessati all'obiettivo scientifico — che può diventare parte attiva delle attività di ricerca e sviluppo, ad esempio contribuendo a sperimentazioni decentralizzate o alla raccolta di dati.

In questo nuovo ecosistema, il lancio dei progetti non avviene tramite un'asta tradizionale, bensì attraverso una procedura di vendita nella quale il prezzo del token è definito ex ante, allo scopo di garantire una distribuzione più prevedibile ed equa. Tutte le vendite sono denominate nel token nativo BIO e si fondano sul raggiungimento di un obiettivo di raccolta prestabilito: il lancio è considerato

riuscito soltanto se l'ammontare complessivo di BIO impegnato dalla comunità raggiunge o supera tale soglia (per un tipico lancio di un "agente" l'obiettivo è pari a circa 1,025 milioni di BIO, corrispondenti a circa 77.000 dollari). In caso contrario, ossia qualora l'obiettivo non venga raggiunto nel periodo fissato per la vendita (generalmente compreso tra due e tre giorni), tutti i fondi e i punti precedentemente impegnati vengono integralmente restituiti agli utenti. La partecipazione a un lancio richiede l'esecuzione di due azioni complementari: da un lato, l'utilizzo dei BioXP ("Bio Experiment Points"), che l'utente deve impiegare per garantirsi il diritto a un'assegnazione; dall'altro, l'impegno effettivo di un certo quantitativo di token BIO che si intende investire nel progetto. L'allocazione finale dei token del nuovo progetto è determinata in modo proporzionale sulla base dei BioXP promessi dall'utente rispetto al totale dei punti impiegati da tutti i partecipanti. Poiché i lanci risultano spesso sovrascritti, ossia caratterizzati da un ammontare complessivo di BIO impegnato superiore all'obiettivo iniziale, l'allocazione effettiva viene ridotta proporzionalmente e soggiace a un tetto massimo per singolo partecipante: nessun utente può infatti acquisire più dello 0,5% dell'offerta totale di token, al fine di garantire una partecipazione sufficientemente diffusa. Qualora un utente abbia impegnato un ammontare di BIO superiore a quello corrispondente alla propria allocazione finale, l'eccedenza di BIO e gli eventuali BioXP non utilizzati vengono restituiti.

L'esito del lancio è dunque funzione diretta del rapporto tra l'ammontare complessivo di BIO conferito dagli utenti e l'obiettivo di finanziamento prefissato. Nel caso di un lancio sotto-finanziato (con contributi inferiori al 100% dell'obiettivo), l'operazione è considerata non riuscita: nessun token viene emesso, non viene creato alcun pool di liquidità su Automated Market Maker (AMM) e gli utenti possono recuperare manualmente, tramite la piattaforma, sia i BIO sia i BioXP precedentemente impegnati. Se il lancio risulta esattamente finanziato (pari al 100% dell'obiettivo), esso è considerato riuscito: tutti i contributi in BIO vengono automaticamente associati ai nuovi token del progetto per costituire un pool di liquidità iniziale su un AMM supportato e gli utenti possono richiedere la propria allocazione di token attraverso l'interfaccia della piattaforma. Nel caso di un lancio in sovrannumero (con contributi superiori al 100% dell'obiettivo), le allocazioni vengono invece distribuite pro-quota in base al peso relativo dei BioXP impegnati da ciascun partecipante rispetto al totale dei punti utilizzati nella vendita; qualsiasi importo di BIO o BioXP in eccesso e non applicato all'assegnazione finale può essere successivamente richiesto e recuperato dall'utente, sempre tramite la piattaforma. In questo modo, il meccanismo coniuga trasparenza, prevedibilità delle

condizioni economiche e un'equa partecipazione della comunità alla fase iniziale di finanziamento dei progetti.

PROVENIENZA VERIFICABILE DEI CONTRIBUTI: Questa seconda dimensione introduce le dimensioni di trasparenza e continuità. Se ci soffermiamo ora sui contributi non di matrice monetaria ma intesi come attività di peer review o replicabilità dei risultati, l'approccio Desci mira a non esaurirli più nella sola verifica tecnico-scientifica dei risultati, ma questa viene reinterpretata come momento cruciale di trasferimento tecnologico (tech transfer), in cui la conoscenza prodotta in contesti di ricerca viene progressivamente tradotta in applicazioni effettivamente comprensibili, adottabili e sostenibili nei contesti d'uso reali. Tradizionalmente, il tech transfer è stato concepito come il passaggio lineare dai laboratori alla società o al mercato – ad esempio attraverso brevetti, licenze o spin-off – focalizzato prevalentemente sulla protezione e sulla valorizzazione economica della proprietà intellettuale. L'approccio DeSci amplia e riorienta questa visione: al fianco delle consuete verifiche tecniche e accademiche, introduce una dimensione marcatamente sociale e partecipativa, nella quale la domanda centrale non mira solo a verificare se un modello “funziona” secondo i criteri dei ricercatori o delle imprese, ma anche se la soluzione risulta comprensibile, accettabile e realmente adottabile da parte degli attori che dovrebbero utilizzarla.

In altri termini, si cerca di integrare la validazione scientifica con una validazione contestuale, nella quale vengono esaminate non solo la solidità metodologica e la coerenza interna dei risultati, ma anche la loro rilevanza per i bisogni degli utenti, la loro usabilità nelle pratiche quotidiane e il loro impatto concreto sui sistemi sociali e organizzativi coinvolti. Nella catena del valore tradizionale, la validazione tende a rimanere confinata principalmente alla dimensione tecnico-scientifica (correttezza del metodo, qualità dei dati, efficacia della soluzione in ambiente controllato) e, in misura minore, a quella organizzativa (rispetto di procedure interne, conformità a standard e regolamenti). Ciò determina almeno due criticità: da un lato, un potenziale scollamento tra validità tecnica e adozione reale, per cui una soluzione impeccabile in laboratorio può rivelarsi inefficace o difficilmente utilizzabile in situazioni d'uso ordinarie; dall'altro, la mancata inclusione degli stakeholder nel processo di verifica, dal momento che cittadini, operatori, pazienti, studenti o comunità locali – cioè i soggetti chiamati a utilizzare o a subire gli effetti dell'innovazione – sono raramente coinvolti nella fase di valutazione e non hanno quindi la possibilità di evidenziare per tempo ostacoli, barriere d'uso o criticità etiche.

Il nuovo modello si propone di colmare questo divario riformulando il tech transfer come processo intrinsecamente collaborativo e distribuito; i criteri di validazione adottati sono più ampi rispetto a quelli tecnici tradizionali, includendo sistematicamente dimensioni quali accessibilità, equità, accettabilità sociale, sostenibilità e rispetto dei diritti dei soggetti coinvolti. In questo modo, la validazione diviene al tempo stesso un momento di verifica della robustezza tecnica e un passaggio qualificante del trasferimento tecnologico: non semplice “filtro” a valle della ricerca, ma spazio di confronto strutturato tra conoscenza scientifica e contesto sociale, orientato a garantire che le soluzioni sviluppate siano non soltanto corrette dal punto di vista teorico, ma anche effettivamente adottabili e generatori di valore per la collettività.

La fase di validazione assume un ruolo fondamentale di attestazione di qualità, infatti le decisioni dei finanziatori sono generalmente guidate da due obiettivi fondamentali: sostenere progetti che risultino coerenti con la missione istituzionale dell’organizzazione e destinare le risorse a ricercatori e iniziative in grado di garantire un ritorno sull’investimento prevedibile e relativamente sicuro. A tal fine, gli enti finanziatori invitano i ricercatori a presentare richieste formali di finanziamento e valutano tali proposte sulla base della **qualità** percepita rispetto agli obiettivi esplicitati. La gestione di questo processo assorbe abitualmente oltre il cinque per cento del budget operativo degli enti, rappresentando una fonte rilevante di costi amministrativi.

Tra i progetti al momento attivi nell’ecosistema DeSci, ResearchHub assume rilevanza in tale contesto proponendo un modello alternativo in cui i contributi scientifici vengono tracciati e ricompensati direttamente all’interno della piattaforma. Ogni utente dispone di un punteggio di reputazione (**REP**) specifico per area disciplinare, che cresce nel tempo in funzione di attività osservabili quali la condivisione, la sintesi, la cura e la discussione di articoli scientifici; tale reputazione può essere inoltre calcolata retroattivamente per i ricercatori che rivendicano le proprie pubblicazioni verificando la loro identità sulla piattaforma. ResearchHub utilizza il token **ResearchCoin (RSC)**: gli utenti possono guadagnare RSC per i loro contributi; il token è impiegato per creare **reward** che remunerano specifiche attività ad alto valore aggiunto, come la peer review, le revisioni della letteratura o la richiesta di chiarimenti metodologici, configurando di fatto un mercato aperto per il lavoro scientifico che tradizionalmente rimane non retribuito. La qualità della ricerca non viene più inferita quindi ex post da indicatori come l’impact factor, ma valutata in modo granulare a livello di singolo contenuto e di singola interazione. Il processo di peer review è reso più trasparente grazie a una sezione dedicata (“Reviews”) in cui i revisori sono chiamati a esprimere giudizi

strutturati e punteggi numerici su vari aspetti del lavoro, secondo linee guida pubbliche e con la possibilità di accedere a programmi formali che prevedono compensi standardizzati in RSC per le review considerate di alta qualità.

STRUTTURATO MECCANISMO DI INCENTIVI: Lo strutturato meccanismo di incentivi costituisce uno degli elementi più distintivi degli ecosistemi DeSci, in quanto introduce una relazione esplicita e programmabile tra contributo apportato e valore riconosciuto. Nei modelli tradizionali di produzione della conoscenza, gli incentivi sono spesso indiretti, ritardati e concentrati su output finali (pubblicazioni, impact factor, avanzamenti di carriera), lasciando scoperta un'ampia area di attività essenziali ma scarsamente riconosciute, come la condivisione dei dati, la gestione dei dataset, la revisione paritaria, la replica degli esperimenti o lo sviluppo di strumenti open source. Le architetture Web3 consentono invece di scomporre il processo scientifico in una molteplicità di micro-azioni tracciabili e incentivabili, rendendo possibile una remunerazione più granulare, continua e trasparente.

In questi sistemi, smart contract e token fungono da infrastruttura di coordinamento economico: ogni contributo – dalla pubblicazione di un dataset alla validazione di un risultato, fino alla partecipazione a processi di peer review o governance – può essere associato a regole automatiche di ricompensa. Gli incentivi non sono limitati alla dimensione monetaria, ma includono token di governance, reputazione on-chain, diritti di accesso privilegiati o partecipazioni future ai benefici economici derivanti dalla valorizzazione della ricerca. In questo modo, il contributo scientifico diventa un'attività economicamente e socialmente sostenibile anche al di fuori dei circuiti accademici tradizionali, ampliando la platea dei partecipanti e riducendo le barriere di ingresso.

Un aspetto cruciale è la programmabilità degli incentivi, che permette di allinearli agli obiettivi epistemici del sistema. Attraverso meccanismi come staking, slashing, reward condizionate o quadratic funding, è possibile premiare comportamenti cooperativi di lungo periodo e scoraggiare contributi opportunistici o di bassa qualità. Ad esempio, la remunerazione di un dataset o di un articolo può essere subordinata al suo effettivo riuso, alla citazione verificabile o alla validazione indipendente dei risultati; analogamente, chi partecipa a una peer review può essere incentivato non solo per la rapidità, ma per la qualità e l'impatto del feedback fornito. L'incentivo diventa così uno strumento di governance, capace di influenzare le dinamiche di produzione della conoscenza in modo più diretto rispetto alle policy istituzionali tradizionali.

Dal punto di vista economico, questi modelli introducono una nuova forma di monetizzazione della conoscenza, che non si basa sulla privatizzazione dell'accesso, ma sulla condivisione regolata e sull'uso effettivo degli asset informativi. Dataset, modelli o risultati intermedi possono generare flussi di valore ricorrenti attraverso licenze digitali on-chain, royalty automatiche o meccanismi di revenue sharing programmabili. Ciò consente di superare la dicotomia tra open science e sostenibilità economica, dimostrando come l'apertura possa coesistere con modelli di incentivo che premiano chi contribuisce in modo significativo al progresso scientifico.

INDIRIZZABILITA' UNIVOCA E VERSIONING IMMUTABILE: Sono elementi cruciali soprattutto nei contesti scientifici caratterizzati da iterazioni frequenti. Questi meccanismi consentono di tracciare in modo preciso quale versione di un dataset o di un modello è stata utilizzata in un esperimento, chi ha introdotto una modifica e in quale fase del progetto questa è avvenuta. Il versioning immutabile diventa un abilitatore diretto della replicabilità: la possibilità di accedere esattamente alla stessa versione di dati e codice utilizzata nell'esperimento originale riduce l'incertezza metodologica e aumenta la robustezza dei risultati. Ogni oggetto – paper, dataset, protocollo o modello – è identificato da un codice univoco e persistente che ne garantisce la tracciabilità nel tempo evitando i problemi di link rot e consentendo il recupero esatto dell'asset originario. La DeSci abilita l'accessibilità del sapere, che diventa comprensibile e riutilizzabile da comunità eterogenee, non solo dagli addetti ai lavori non limitandosi a depositare la conoscenza in repository tecnici o accademici, ma preoccupandosi di tradurla in formati inclusivi e di garantirne la circolazione aperta (open access, open data, toolkit, guide pratiche).

Come visto, nei sistemi di gestione dei dati, un elemento ricorrente è la separazione strutturale tra il luogo in cui i dati risiedono e il livello di coordinamento blockchain che ne governa accessi, diritti e tracciabilità. In questi modelli, i dataset non vengono mai memorizzati direttamente on-chain – soluzione inefficiente, costosa e incompatibile con la protezione dei dati personali – ma sono conservati in infrastrutture di storage off-chain eterogenee: servizi cloud tradizionali (es. AWS S3, Google Drive), repository on-premise, dispositivi locali, oppure sistemi Web3 decentralizzati come IPFS, Filecoin o reti di storage distribuito gestite da provider autorizzati. La blockchain svolge invece il ruolo di registro di controllo, ospitando unicamente metadati crittografati, riferimenti ai contenuti (URL o hash), e soprattutto gli elementi che definiscono la governance

del dato, quali diritti di accesso, licenze digitali, consensi degli utenti o la proprietà intellettuale tokenizzata sotto forma di NFT.

L'integrità e la cronologia degli asset informativi sono assicurate attraverso un duplice meccanismo. Da un lato, l'indirizzamento crittografico dei file – tipico dei sistemi distributed storage – consente di rilevare istantaneamente ogni modifica non autorizzata, poiché il contenuto è identificato dal proprio hash univoco; dall'altro, la blockchain registra in modo immutabile e temporalmente ordinato tutte le operazioni rilevanti: creazione dell'asset digitale, trasferimenti di token d'accesso, esecuzione di computazioni autorizzate, modifiche allo stato del consenso. Ne deriva una auditability end-to-end: ogni attore può verificare l'esistenza, la paternità e la sequenza temporale degli eventi legati al dato, con un livello di trasparenza che supera quello dei sistemi informativi tradizionali basati su log centralizzati.

Il trattamento dei dati sensibili, in particolare di quelli clinici e personali, è garantito da un insieme di soluzioni tecniche e procedurali che convergono verso un principio centrale: la massima tutela possibile senza sacrificare la possibilità di utilizzo scientifico del dato. Per questo motivo, i dati rimangono sempre nella disponibilità del provider o dell'istituzione che li detiene, mentre l'accesso è regolato da meccanismi crittografici, tokenizzati e verificabili on-chain. Modelli come il Compute-to-Data permettono di eseguire algoritmi “accanto” ai dati, condividendo solo risultati aggregati o anonimizzati anziché il dataset originale, riducendo drasticamente il rischio di fuga informativa e garantendo la conformità alle normative sulla privacy (come il GDPR). A ciò si aggiungono sistemi di permessi granulari basati su credenziali verificabili, nonché processi di segnalazione e rimozione (purgatory) per gestire eventuali violazioni di proprietà intellettuale o pubblicazione indebita di dati personali.

Nel loro insieme, queste architetture ibride – dati off-chain, controllo on-chain – delineano un modello innovativo di infrastruttura scientifica: trasparente nei processi, verificabile nella storia, ma protettiva nei confronti dei contenuti sensibili, offrendo così un compromesso avanzato tra decentralizzazione, sicurezza e utilità della conoscenza condivisa.

RIDUZIONE DEL TIME-TO-PUBLISH E ACCESSO PERMISSIONLESS: Nei modelli tradizionali, la pubblicazione e la fruizione dei risultati della ricerca sono vincolate a passaggi sequenziali – peer review editoriale, negoziazioni contrattuali, autorizzazioni istituzionali – che introducono ritardi e barriere di ingresso. Al contrario, negli ecosistemi analizzati l'intero ciclo di vita del dato è orchestrato da smart contract e marketplace decentralizzati: una volta che

un articolo, un dataset o un servizio di calcolo viene pubblicato on-chain o referenziato tramite token, esso diviene immediatamente visibile e potenzialmente utilizzabile da chiunque soddisfi le condizioni codificate nel contratto, senza necessità di trafile manuali o intervento di intermediari centrali. In questo contesto, è possibile distinguere in modo utile due tipologie di marketplace. Da un lato, esiste un marketplace “tipico” dei progetti ascrivibili al *research layer*, che rientra nel concetto classico di mercato: uno spazio in cui si scambiano asset di ricerca (token, IP-NFT, quote progettuali) e nel quale gli utenti possono divenire, in senso economico e talvolta anche giuridico, titolari di porzioni di progetti di ricerca, partecipando ai potenziali ritorni della loro valorizzazione scientifica o commerciale. Dall’altro lato, si afferma una forma di marketplace riconducibile al *knowledge layer*, inteso come luogo attraverso cui è possibile “acquistare” o attivare diritti di fruizione: l’utente non acquisisce una quota del progetto, bensì consensi e permessi – formalizzati in token e politiche di accesso – che gli consentono di interrogare un dataset, eseguire query o attivare computazioni (ad esempio tramite meccanismi di *compute-to-data*), ottenendo informazione derivata senza necessariamente ottenere il controllo diretto sui dati sottostanti. In entrambe le tipologie, il ruolo delle licenze digitali on-chain è centrale: in Ocean Protocol e Bluzelle, ad esempio, i diritti d’uso sono incorporati in datatoken o IP-NFT/PFT, con la possibilità di programmare royalty automatiche, revenue share e altre forme di redistribuzione del valore; in ResearchHub, token e metriche reputazionali orientano la visibilità e la remunerazione dei contributi scientifici. L’access control non è più affidato a sistemi centralizzati (login proprietari, whitelist chiuse), ma implementato direttamente a livello di smart contract e di credenziali crittografiche: solo i soggetti che detengono determinati token o soddisfano specifici requisiti (ruoli, attestazioni, consensi registrati on-chain) possono accedere a un asset, interrogarlo o integrarlo nei propri flussi di ricerca. Ne deriva un’infrastruttura in cui il tempo che intercorre tra produzione, pubblicazione e riuso della conoscenza si riduce drasticamente, mentre le condizioni di accesso sono rese esplicite, trasparenti e verificabili grazie alle regole automatiche codificate nella logica dei marketplace e degli smart contract.

4.2 Impatto qualitativo

Come detto, l’analisi dell’ecosistema DeSci evidenzia la presenza di due distinti livelli applicativi, concettualmente separabili ma funzionalmente interconnessi: il *research layer*, costituito da piattaforme orientate al finanziamento, alla governance e alla gestione operativa di progetti di ricerca biotecnologica, e il *knowledge layer*, in cui il fulcro dell’attività è rappresentato dalla circolazione,

valorizzazione e monetizzazione dei dati scientifici. La marcata eterogeneità degli attori coinvolti e delle funzioni svolte all'interno dell'ecosistema ha reso necessaria una trattazione separata delle rispettive catene del valore, una per ciascun livello applicativo. La finalità dell'analisi di seguito proposta è individuare in quali fasi delle value chain e con quali modalità gli outcome descritti nel 4.1 possano incidere.

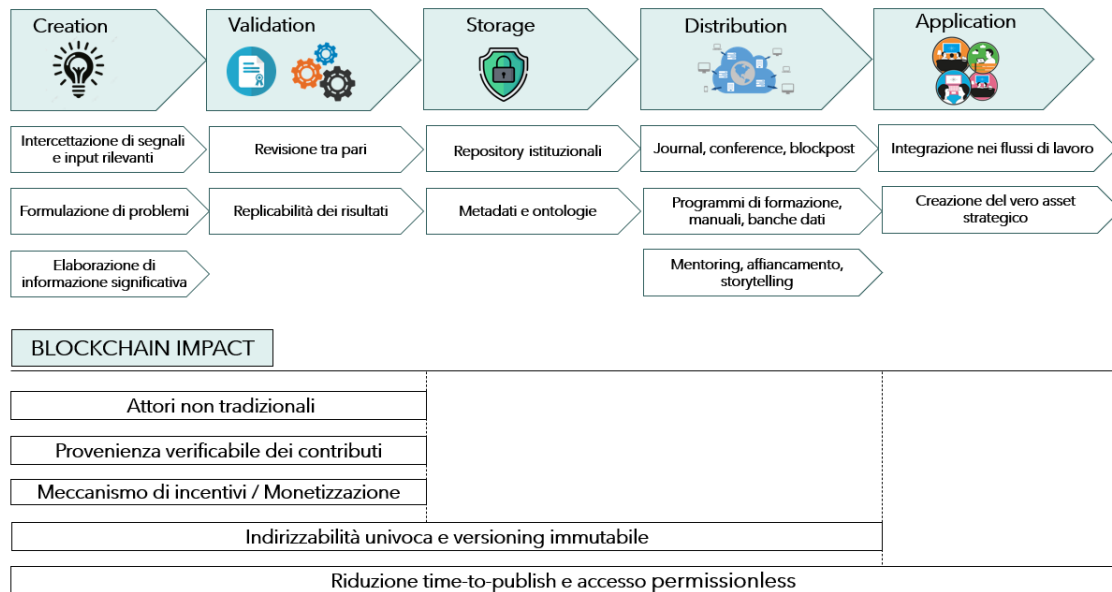


Figura 4.1 – Research Layer Value Chain

La figura schematizza la **value chain del research layer** come una sequenza di cinque macro-fasi del processo di creazione della conoscenza—**Creation, Validation, Storage, Distribution, Application**—esplicitando, per ciascuna, alcuni output tipici. Nella fase di **Creation** rientrano attività di intercettazione di segnali e input rilevanti, formulazione dei problemi ed elaborazione di informazione significativa; la **Validation** include meccanismi di revisione tra pari e verifiche di replicabilità; la **Storage** riguarda l'archiviazione in repository (anche istituzionali) e la strutturazione tramite metadati e ontologie; la **Distribution** comprende i canali di disseminazione formale e informale (journal, conferenze, blogpost), ma anche strumenti di trasferimento e sedimentazione operativa (programmi di formazione, manuali, banche dati) e pratiche relazionali come mentoring e storytelling; infine l'**Application** rappresenta l'integrazione della conoscenza nei flussi di lavoro fino alla trasformazione in un asset strategico. Nella sezione inferiore ("**Blockchain impact**") la figura evidenzia come le soluzioni blockchain-based non influenzano la catena del valore in modo uniforme: per

ciascun **outcome abilitato** viene indicata la **portata dell'impatto** in termini di fasi coinvolte (ampiezza orizzontale). In particolare, alcuni effetti—come l'abilitazione di **attori non tradizionali**, la **provenienza verificabile dei contributi** e i **meccanismi di incentivi/monetizzazione**—risultano più concentrati nelle fasi iniziali, dove si generano contributi e si attivano dinamiche di partecipazione e accountability. Al contrario, proprietà infrastrutturali come **indirizzabilità univoca** e **versioning immutabile** estendono l'impatto verso le fasi centrali (conservazione e circolazione degli artefatti conoscitivi), sostenendo tracciabilità e gestione robusta delle versioni lungo repository e canali di diffusione.

Andando ora più nel dettaglio, l'introduzione di attori non tradizionali, la provenienza verificabile dei contributi e l'adozione di uno strutturato meccanismo di incentivi impattano in modo significativo sulle prime due fasi della catena del valore, ovvero la creazione e la validazione della conoscenza. In particolare, le community delle piattaforme assumono infatti un ruolo attivo attraverso sia meccanismi di voto che permettono di selezionare i progetti ritenuti meritevoli di finanziamento, sia attraverso la produzione di attività di peer review e di esperimenti finalizzati alla verifica della replicabilità dei risultati. Ogni contributo fornito dalla comunità, sia esso di natura economica o legato all'attestazione della qualità scientifica, risulta tracciabile e verificabile grazie alle proprietà intrinseche della tecnologia blockchain, garantendo trasparenza e attribuzione univoca delle responsabilità. Tali contributi sono inoltre sostenuti da specifici schemi di incentivazione, che rendono economicamente e decisionalmente vantaggiosa la partecipazione degli attori, come nel caso dei finanziatori, i quali possono ottenere una porzione del progetto proporzionale alla quota investita e, conseguentemente, un determinato grado di potere decisionale sulle evoluzioni del progetto stesso. L'outcome successivo, rappresentato dall'indirizzabilità univoca e dal versioning immutabile, estende il suo impatto anche alle fasi di storage e distribuzione della conoscenza: i risultati intermedi prodotti dai progetti di ricerca finanziati vengono infatti pubblicati in modo tempestivo, consentendo l'identificazione univoca di ogni versione del progetto e la ricostruzione storica delle modifiche apportate nel tempo. Infine, la riduzione del *time-to-publish* e l'accesso permissionless, pur agendo in modo più indiretto, interessano anche la fase applicativa, poiché la disponibilità immediata dei risultati favorisce una rapida fruizione della conoscenza e una più efficiente integrazione nei flussi di lavoro, contribuendo alla trasformazione della ricerca in un vero e proprio asset strategico.

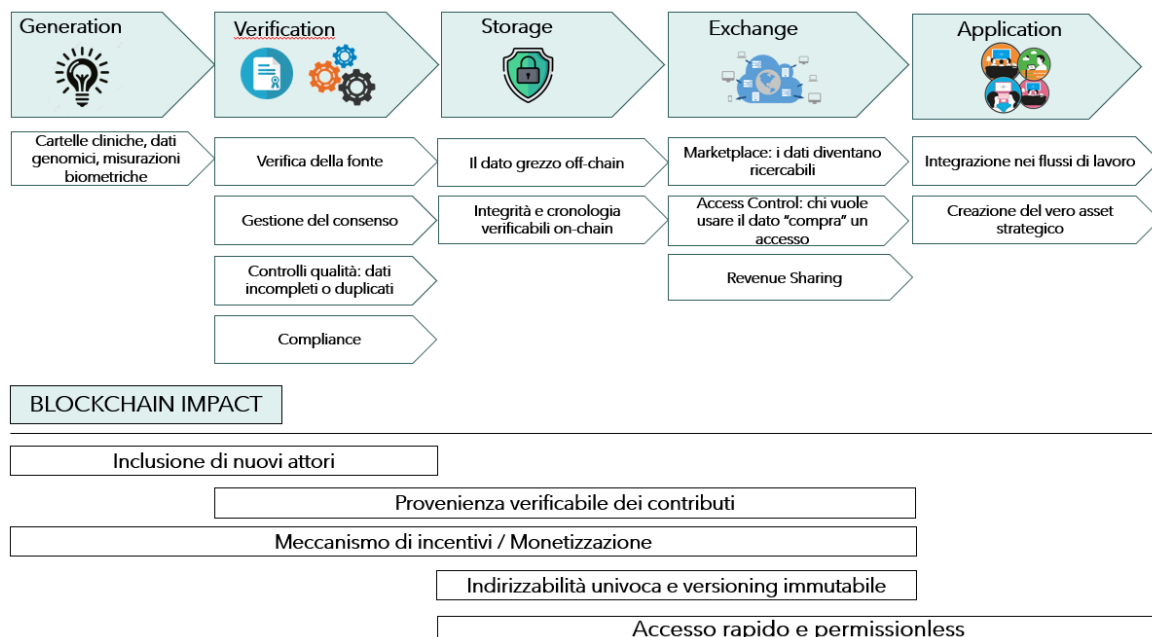


Figura 4.2 – Knowledge Layer Value Chain

Con riferimento alla value chain dei progetti appartenenti al *knowledge layer*, è possibile osservare come gli outcome individuati incidano in modo differenziato ma sistematico sulle diverse fasi della catena del valore, che in questo caso si articola nella generazione, verifica, storage, scambio e applicazione del dato scientifico.

Analogamente a quanto rilevato per il *research layer*, l'introduzione di attori non tradizionali impatta in primo luogo le fasi di generazione e verifica del dato, poiché le community delle piattaforme possono contribuire attivamente fornendo dataset destinati alla circolazione pubblica. Tali contributi sono caratterizzati da una provenienza verificabile, che rappresenta un elemento centrale dell'architettura del *knowledge layer* e che estende il proprio impatto alle fasi di verifica, storage ed exchange: ogni dato che circola all'interno dell'ecosistema è infatti accompagnato da informazioni certe circa la sua provenienza e origine; Questo livello di tracciabilità consente di rafforzare la fiducia nel dato e di abilitarne l'utilizzo in contesti applicativi ad elevata criticità.

Parallelamente, ciascun attore è incentivato a fornire il proprio contributo attraverso meccanismi di monetizzazione diretta, che spesso si concretizzano nella possibilità di vendere il dataset o di renderlo interrogabile da terzi previo consenso esplicito dell'utente, introducendo così una relazione economica strutturata tra produttori e utilizzatori del dato.

L'outcome relativo all'indirizzabilità univoca e al versioning immutabile coinvolge in maniera prevalente le fasi di storage ed exchange: una volta che l'utente autorizza l'archiviazione e la distribuzione del dataset, ogni sua versione risulta univocamente identificabile, garantendo la possibilità di distinguere con precisione aggiornamenti, modifiche e derivazioni successive. Infine, l'accesso rapido e permissionless incide trasversalmente sulle fasi di storage, exchange e applicazione, poiché la verifica dell'integrità del dato archiviato avviene in modalità aperta, il funzionamento del marketplace dei dati non richiede autorizzazioni preventive e, analogamente a quanto osservato per il *research layer*, la disponibilità immediata dell'informazione accelera l'integrazione del dato nei flussi di lavoro, favorendo la trasformazione dello stesso in un asset strategico ad alto valore applicativo.

Capitolo 5

Risultati quantitativi

5.1 Scheda di Progetto

Come spiegato nella sezione metodologica, al fine di valutare l'effettivo grado di decentralizzazione raggiungibile dalle piattaforme che popolano l'ecosistema della DeSci, ci si avvale del calcolo di due indici sintetici, l'indice di centralità (C_x) e l'indice di decentralizzazione (D_x), che presentano le seguenti formule matematiche:

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^n [C_x(p^*) - C_x(p_i)]}{H}$$

dove $C_x(p_i)$ rappresenta la centralità del nodo i , $C_x(p^*)$ è il valore massimo di centralità osservato nella rete, n è il numero totale di nodi e $H = (n - 1)^2$ è il fattore di normalizzazione.

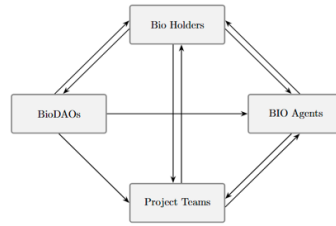
$$D_x = \frac{\text{Numero di cooperazioni esistenti}}{\text{Numero massimo di cooperazioni}}$$

dove il numero massimo di cooperazioni è pari a $N(N - 1)$, assumendo che ogni attore possa potenzialmente instaurare una relazione diretta con tutti gli altri.

Al fine di pervenire al calcolo degli indici C_x (grado di centralità) e D_x (grado di decentralizzazione), l'analisi condotta su ciascuna piattaforma ha portato alla produzione sistematica di distinti output, successivamente sintetizzati all'interno di una *scheda di progetto*; la scheda relativa a **Bio Protocol**, qui riportata a titolo esemplificativo, ne chiarisce l'impostazione metodologica.

BIO PROTOCOL

| Agent 🙌 Principal | Bio Holders | Bio DAOs | Bio Agents | Project Teams |
|----------------------|---------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Bio Holders | | Forniscono token di governance | Forniscono token dell'agente | Forniscono project token |
| Bio DAOs | Votano o Finanziano | | | |
| Bio Agents | Votano o Finanziano | Sviluppano | | Sviluppano |
| Project Teams | Votano o Finanziano | Sviluppano | Ne supportano lo sviluppo | |



$$D_x = \frac{N^{\circ} \text{ cooperazioni esistenti}}{N^{\circ} \text{ cooperazioni possibili}} = \frac{5}{6}$$

$$C_x = \frac{\sum_i^n [C_x(p^*) - C_x(p_i)]}{H} = \frac{(3-3) + (3-2) + (3-2) + (3-3)}{9} = \frac{2}{9}$$

$$H = (N-1)^2 = 9$$

Piattaforma che funge da *financial layer* per la biotecnologia, permettendo a comunità globali di finanziare, sviluppare e governare collettivamente progetti scientifici e biotech tokenizzati.

Figura 5.1 – Scheda di progetto

In primo luogo, è stata costruita una tabella descrittiva delle interazioni, popolata dagli attori della piattaforma e organizzata secondo una distinzione concettuale tra **principali** e **agenti**. In tale formalizzazione, il *principale* è l'attore rispetto al quale si valuta l'effetto delle relazioni, mentre l'*agente* è l'attore che esegue un'azione il cui esito si ripercuote sul principale (ad esempio in termini di finanziamento, voto, sviluppo o allocazione di token). La tabella delle azioni, quindi, non si limita a elencare i soggetti coinvolti, ma esplicita la direzionalità e la natura delle attività esercitate tra coppie di attori, rendendo osservabile la struttura operativa del protocollo. In secondo luogo, sulla base di questa matrice relazionale, è stato generato un **grafo interconnesso**: a ciascun attore è associato un nodo e le relazioni sono rappresentate mediante archi orientati (freccie), che modellano le azioni esercitate da un attore verso un altro. Tale rappresentazione grafica consente di tradurre le interazioni qualitative in una topologia di rete, propedeutica alla quantificazione della configurazione del sistema.

In questo modo, la *scheda di progetto* funge da ponte tra la descrizione funzionale della piattaforma e la successiva fase di formalizzazione matematica, rendendo tracciabile il percorso che conduce alla determinazione di C_x e D_x a partire dalla mappatura esplicita degli attori e delle loro relazioni.

Per rendere maggiormente esplicito il procedimento adottato, si descrive di seguito — con finalità esemplificative — il caso di **Bio Protocol**, la cui analisi ha

portato all'identificazione di **quattro attori** rilevanti, distinti in base a funzioni e ruoli entro l'architettura del protocollo.

In primo luogo, i **BIO Holders** sono i detentori del token nativo **BIO**, il quale abilita due macro-funzioni. La prima è la **governance**, poiché i possessori possono votare su regole di protocollo, allocazione delle risorse, istituzione di nuove BioDAO, attivazione di Bio Agents e approvazione di progetti specifici. La seconda è il **funding**, in quanto i BIO Holders possono destinare risorse in BIO a una BioDAO, a uno o più Bio Agents, oppure direttamente ai team di progetto. Tale meccanismo di finanziamento risulta strettamente integrato con un sistema di incentivi token-based: a fronte dell'allocazione di BIO, i BIO Holders ricevono **DAO token** nel caso di finanziamento di una BioDAO, **Agent token** nel caso di finanziamento di un Bio Agent, oppure **Project token** qualora il contributo sia indirizzato direttamente a un **Project Team**.

In secondo luogo, le **BioDAOs** rappresentano entità di coordinamento e governo collettivo: i soggetti che detengono **DAO token** partecipano alla governance della DAO e risultano esposti—in termini economici—al valore del portafoglio di *project token* detenuto dalla stessa. In questa prospettiva, il DAO token incorpora simultaneamente (i) un **diritto decisionale** sulle scelte di finanziamento, sulle modalità di impiego del treasury e sulle regole interne, (ii) un **diritto economico** inteso come esposizione al valore aggregato generato dalle attività coordinate dalla DAO (ad esempio progetti finanziati e asset detenuti), e (iii) un **meccanismo di incentivo** che premia la capacità collettiva di selezione, coordinamento e monitoraggio dei progetti.

Infine, i **BIO Agents** costituiscono attori operativi orientati all'esecuzione: quando contribuiscono allo sviluppo di un progetto specifico, essi ricevono **project token** direttamente dal relativo **Project Team**, configurando così una relazione di scambio che collega l'azione di sviluppo (o supporto allo sviluppo) a un riconoscimento economico tokenizzato.

Questa esplicitazione dei ruoli, oltre a chiarire la logica funzionale del protocollo, consente di interpretare coerentemente le relazioni codificate nella tabella delle azioni e, di conseguenza, la struttura del grafo utilizzato come base per il calcolo degli indici C_x e D_x .

Al fine di rendere la *scheda di progetto* non solo uno strumento di formalizzazione delle relazioni utili al calcolo di C_x e D_x , ma anche un supporto informativo completo e immediatamente interpretabile, è stato inoltre inserito—

come corollario—un breve **summary descrittivo**. Tale sintesi ha la funzione di chiarire, in termini generali e introduttivi, **l’oggetto della piattaforma, il settore di riferimento** entro cui essa opera e le **attività chiave** abilitate (ad esempio meccanismi di governance, modalità di finanziamento, coordinamento dei progetti e logiche di incentivo). In questo modo, la scheda integra la rappresentazione strutturale delle interazioni (tabella e grafo) con un inquadramento contestuale, riducendo ambiguità interpretative e rendendo più trasparente la connessione tra finalità del protocollo e configurazione delle relazioni osservate.

5.2 Risultati Complessivi

I risultati ottenuti dalle schede di progetto di tutte le piattaforme sono in questa tabella brevemente schematizzati.

| Projects | Dx | Cx | H | N | ATTORI | REL. INBOUND | REL. OUTBOUND | LAYER |
|-----------------|--------|-------|----|---|--|-------------------|-------------------|----------------------|
| Bio Protocol | 83,33% | 22,2% | 9 | 4 | Bio Holder, Bio Agent, Project Team, BioDAO | 2 ; 2 ; 3 ; 1 | 2 ; 2 ; 2 ; 3 | Research |
| Rejuve | 66,67% | 22,2% | 9 | 4 | Contributore, Ricercatore, Rejuve Biotech, Clinica | 2 ; 2 ; 2 ; 2 | 2 ; 2 ; 2 ; 2 | Knowledge |
| Weave Chain | 66,67% | 11,1% | 9 | 4 | Fornitore, Consumatore, Nodo, Attestatore | 3 ; 3 ; 3 ; 0 | 2 ; 2 ; 2 ; 3 | Knowledge |
| Ocean Protocol | 58,33% | 55,6% | 9 | 4 | Utilizzatore, Fornitore, Runner, Ambassador | 3 ; 2 ; 2 ; 0 | 2 ; 1 ; 1 ; 3 | Knowledge |
| Data Lake | 66,67% | 44,4% | 9 | 4 | Ricercatore, Provider, Paziente, Ambassador | 2 ; 3 ; 3 ; 0 | 2 ; 2 ; 1 ; 3 | Knowledge |
| Transhuman Coin | 83,33% | 25% | 4 | 3 | Ricercatore, Comitato, Community | 2 ; 1 ; 1 | 2 ; 2 ; 1 | Research |
| Genomes.io | 83,33% | 25% | 4 | 3 | Utente, Ricercatore, Organizzazione | 1 ; 2 ; 2 | 2 ; 2 ; 1 | Research |
| ResearchHub | 40% | 43,7% | 16 | 5 | Autore, Curatore, Revisore, Editore, Donatore | 4 ; 0 ; 2 ; 1 ; 1 | 1 ; 3 ; 1 ; 2 ; 1 | Research / Knowledge |
| Bluzelle | 41,67% | 33,3% | 9 | 4 | Ricercatore, Utilizzatore, Finanziatore, Community | 3 ; 1 ; 1 ; 1 | 3 ; 1 ; 1 ; 1 | Knowledge |

| | | | | | | | | |
|-----------|-----|-------|----|---|---|--------------------------|--------------------------|-----------|
| Galeon | 50% | 22,2% | 9 | 4 | Paziente, Sanitario, Ospedale, Ricercatore | 2 ; 0 ; 3 ; 2 | 1 ; 2 ; 1 ; 2 | Knowledge |
| BitDoctor | 40% | 24% | 25 | 6 | Contributore, Aggregatore, Consumatore, Agente, Specialista, Ambassador | 2 ; 2 ; 3 ; 2 ; 3 ; 0 | 1 ; 3 ; 2 ; 2 ; 1 ; 3 | Knowledge |
| Galeon | 58% | 11,1% | 9 | 4 | Proponente, Creatore, Votante, Organizzazione | 3 ; 1 ; 2 ; 1 | 2 ; 1 ; 2 ; 2 | Knowledge |

Figura 5.2 – Overview dei progetti

I valori calcolati mostrano una variabilità non trascurabile: **Dx** varia da **40%** a **83,33%**, mentre **Cx** varia da **11%** a **55,5%**. In termini sistemici, ciò indica che le piattaforme analizzate non si dispongono lungo un unico continuum “centralizzato → decentralizzato”, ma presentano **configurazioni ibride**, dove la densità delle interazioni (Dx) e la presenza di nodi dominanti (Cx) si combinano in modo diverso.

| Gruppo | Project | D_x | C_x |
|--------|-----------------|--------|-------|
| 1 | BIO PROTOCOL | 83,33% | 22% |
| | REJUVE | 66,67% | 22% |
| | WEAVE CHAIN | 66,67% | 11% |
| | TRANSHUMAN COIN | 83,33% | 25% |
| | GENOMES.IO | 83,33% | 25% |
| | ETICA | 58,3% | 11% |
| 2 | OCEAN PROTOCOL | 58,3% | 55,5% |
| | DATALAKE | 66,67% | 44,4% |
| 3 | RESEARCHHUB | 40% | 43,7% |
| | BLUZELLE | 41,67% | 33,3% |
| | GALEON | 50% | 22,2% |
| | BIT DOCTOR | 40% | 24% |

Figura 5.3 – Raggruppamento dei progetti

La figura riporta in forma tabellare i **valori degli indici** D_x (decentralizzazione delle cooperazioni) e C_x (concentrazione della centralità) calcolati per ciascuna piattaforma analizzata, con l'obiettivo di offrire una **panoramica sinottica** dei risultati quantitativi ottenuti. L'insieme dei valori evidenzia un **marcato grado di eterogeneità**, sia in termini di decentralizzazione sia di centralizzazione, suggerendo che le architetture relazionali e le modalità di coordinamento tra attori variano sensibilmente tra i diversi progetti. Per rendere la lettura descrittiva più fluida e funzionale all'interpretazione, le piattaforme vengono quindi **raggruppate in sottocategorie** sulla base delle combinazioni osservate di D_x e C_x , così da isolare configurazioni ricorrenti e confrontabili.

Si specifica che valori superiori al 60% vengono considerati alti, valori tra il 40% e il 60% vengono considerati medi (medio-alti valori $> 50\%$ e medio-bassi valori $< 50\%$) e valori inferiori al 40% vengono considerati bassi.

Il **primo gruppo** include infatti progetti caratterizzati da D_x **alto** e C_x **basso**, il **secondo gruppo** raccoglie invece piattaforme con D_x alto o **medio-alto** associato a un C_x **medio**, il **terzo gruppo** comprende progetti con D_x **medio-basso** e C_x **basso**.

Il criterio di raggruppamento, pur utile per costruire una tassonomia interpretativa, ammette alcune **eccezioni**: ad esempio **ResearchHub** viene collocato nel terzo gruppo per coerenza rispetto al profilo di D_x , pur presentando un valore di C_x che non può essere considerato pienamente “basso” in senso stretto. Tali discrepanze vengono mantenute esplicite nella tabella proprio per segnalare la presenza di casi ibridi o di frontiera, che verranno **discussi e chiariti nelle sezioni successive**.

Il gruppo caratterizzato da **valori elevati di D_x ($> 60\%$)** e **valori bassi di C_x ($< 40\%$)** rappresenta la configurazione più ricorrente nel campione e, sul piano topologico, descrive reti in cui la connettività risulta **diffusa e relativamente omogenea**, con una limitata concentrazione delle relazioni su pochi nodi dominanti. In questa regione (ad es. BIO Protocol, Rejuve, Weave Chain, Transhuman Coin, Genomes.io) l’architettura relazionale appare coerente con un’impostazione tipicamente “decentralizzata”: l’elevato D_x suggerisce la presenza di molteplici canali di interazione e scambio, mentre il basso C_x indica che tali interazioni non dipendono in modo significativo da un singolo hub o da un sottoinsieme ristretto di attori. Ne deriva una struttura che, in termini di **processo di creazione della conoscenza**, tende a favorire soprattutto le fasi di **generazione** e **circolazione iniziale** dei contributi (ampia partecipazione, riduzione delle barriere all’ingresso e maggiore resilienza rispetto a colli di bottiglia centrali). Al contempo, la stessa combinazione può rendere più onerosa la fase di **sintesi e validazione**: l’assenza di nodi strutturalmente dominanti riduce la capacità “endogena” della rete di selezionare, aggregare e convergere rapidamente verso esiti condivisi, richiedendo spesso meccanismi sostitutivi (regole di protocollo, reputazione, incentivi token-based, procedure di peer review distribuita) per ottenere coordinamento senza reintrodurre centralizzazione.

All’interno di questo gruppo, **Etica** costituisce un caso in parte peculiare: il fatto che presenti un D_x **leggermente inferiore** rispetto agli altri casi (pur restando su valori medio-alti) può essere interpretato come un segnale di **minore intensità complessiva delle interazioni** o, più precisamente, di una rete che abilita la

diffusione ma con **densità relazionale e capacità di propagazione** meno spinte. In termini strutturali, questa differenza suggerisce che la piattaforma potrebbe trovarsi in una condizione in cui le connessioni sono distribuite in maniera molto uniforme (Cx molto basso), ma il “volume” o la “portata” effettiva delle relazioni rimane più contenuta rispetto ai progetti con Dx più alto. Ne deriva una configurazione compatibile con ecosistemi **ancora in consolidamento**, comunità più circoscritte o meccanismi di partecipazione che, pur non generando gerarchie topologiche, producono una rete **meno interconnessa**.

Il secondo gruppo, rappresentato da **Data Lake** (Dx = 66,67%; Cx = 44,4%) e **Ocean Protocol** (Dx = 58,33%; Cx = 55,6%), si colloca in una regione intermedia in cui alla **diffusione delle interazioni** si affianca una **maggiore disuguaglianza strutturale** rispetto al gruppo precedente. In termini topologici, tali valori suggeriscono reti che mantengono una capacità significativa di abilitare scambi e collegamenti (Dx alto o medio-alto ($> 50\%$)), ma in cui emergono con maggiore evidenza **nodi con ruolo di coordinamento o di snodo** (Cx medio (compreso tra 40% e 60%)). Questa combinazione configura un assetto “ibrido”: la rete non risulta pienamente gerarchica, ma neppure completamente uniforme, poiché una quota rilevante della connettività e dei percorsi informativi tende a transitare attraverso attori o componenti infrastrutturali più centrali. Dal punto di vista del **processo di creazione della conoscenza**, tale struttura può risultare particolarmente funzionale nelle fasi di **validazione, selezione e organizzazione** degli output: la presenza infatti di hub o nodi ponte facilita l’aggregazione, riduce i costi di coordinamento e accelera la convergenza verso standard condivisi (ad esempio nella gestione degli accessi e nella definizione di regole operative). Al contempo, la componente di centralizzazione implicita può introdurre rischi di dipendenza da pochi elementi chiave, con potenziali vulnerabilità rispetto a fenomeni di lock-in o colli di bottiglia decisionali, soprattutto qualora i nodi più centrali assumano anche funzioni di governance.

Il terzo gruppo individuato, che include **ResearchHub** (Dx = 40%; Cx = 43,7%), **Bluzelle** (Dx = 41,67%; Cx = 33,3%), **Galeon** (Dx = 50%; Cx = 22,2%) e **Bit Doctor** (Dx = 40%; Cx = 24%), descrive reti in cui la capacità complessiva di diffusione delle interazioni risulta **contenuta** (Dx circa 40–50%) e la struttura appare, nella maggior parte dei casi, **poco centralizzata** (Cx $< 50\%$), con l’eccezione di ResearchHub che mostra una centralità più pronunciata. Sul piano topologico, un Dx medio-basso segnala che la rete abilita un numero relativamente

limitato di collegamenti effettivi o percorsi informativi, con una minore probabilità che contributi, risorse e feedback si propaghino rapidamente e in modo capillare tra i partecipanti. In tale contesto, il vincolo principale non è tanto la presenza di gerarchie o nodi dominanti, quanto la **ridotta intensità relazionale**: la rete tende a essere più “sottile”, con scambi meno frequenti o più concentrati in sotto-comunità, e con una conseguente difficoltà a generare dinamiche cumulative di apprendimento collettivo.

Progetti come Bluzelle, Bit Doctor e Galeon (con C_x relativamente basso) possono essere letti come ecosistemi dove l’orizzontalità è preservata, ma la rete appare ancora **poco integrata**; ciò è compatibile con comunità più piccole, domini applicativi più verticali o stadi di maturità in cui le connessioni non hanno ancora raggiunto una massa critica.

Diversamente, ResearchHub mostra un valore di C_x non profondamente basso e ciò suggerisce la presenza di alcuni nodi con funzione di “raccordo”, ma inseriti in un contesto in cui la connettività generale resta limitata. Ne deriva un modello in cui la rete può risultare relativamente più efficace nel **coordinare** o **organizzare** i flussi informativi disponibili, pur non riuscendo ancora a garantire un’ampia circolazione degli scambi.

5.2.1 Nel processo di creazione della conoscenza

L’obiettivo interpretativo degli indici D_x e C_x è comprendere in che modo la **configurazione strutturale** delle piattaforme—misurata, rispettivamente, come grado di **decentralizzazione delle cooperazioni** e come **concentrazione della centralità**—possa incidere sulle principali fasi del processo di creazione della conoscenza.

In configurazioni in cui D_x assume valori elevati mentre C_x rimane contenuto, la **produzione di conoscenza** tende a strutturarsi come una *pipeline* distribuita, ad alta partecipazione e con scarsa dipendenza da punti di controllo centralizzati. Un D_x **alto** ($D_x > 60\%$) segnala infatti che la rete delle cooperazioni presenta un grado significativo di decentralizzazione: l’interazione non è confinata a poche relazioni “dominanti”, ma si diffonde su un insieme ampio di attori, che contribuiscono in modo relativamente capillare alle diverse fasi della catena del valore — dalla **mobilizzazione delle risorse** (funding e incentivazione), alla **produzione** di output (dati, protocolli, risultati sperimentali). Parallelamente, un C_x **basso** ($C_x < 40\%$) indica che la centralità non è concentrata in un nodo (o in

pochi nodi) con ruolo di *gatekeeping*: gli scambi non risultano polarizzati attorno a un “hub” che filtra, prioritizza o valida in modo predominante i contributi.

Da un punto di vista ingegneristico, tale combinazione di indici descrive un’architettura di collaborazione più vicina a un modello **peer-to-peer**, in cui la capacità di generare e far circolare informazione è *intrinsecamente ridondante* e meno vulnerabile a colli di bottiglia.

Operativamente, questa struttura produce effetti particolarmente evidenti nella fase di **generazione**: la pluralità di nodi attivi amplia il bacino di idee e soluzioni candidate, favorendo varietà cognitiva, esplorazione di alternative e sperimentazione parallela. La conoscenza non emerge come output di un singolo centro, ma come risultato di molte micro-interazioni che, aggregate, alimentano un processo di innovazione più ricco e meno vincolato da traiettorie predefinite. In modo coerente, anche la **validazione** tende a beneficiare di questa configurazione: l’assenza di un unico controllore e la presenza di molteplici relazioni di scambio incentivano forme di *review* distribuita, controlli incrociati e feedback iterativi. Ne deriva un meccanismo di verifica più robusto rispetto a errori e distorsioni, perché la probabilità di individuare bias metodologici, incongruenze o difetti di replicabilità aumenta con la ridondanza dei revisori e con la diversità dei punti di vista. In termini di affidabilità del sistema, la rete presenta quindi una maggiore **fault tolerance**: l’eventuale inattività o errore di un singolo nodo non compromette la capacità complessiva di controllo, poiché la funzione di verifica è “replicata” su più attori. Tuttavia se la rete genera numerosi contributi e li sottopone a una validazione diffusa, non è detto che riesca con pari efficienza a convergere verso un set limitato di priorità condivise, standard operativi comuni o linee di sviluppo dominanti.

In assenza di nodi con elevata capacità di orchestrazione (che, in termini strutturali, corrisponderebbe a una maggiore concentrazione di centralità), il processo decisionale può risultare più lento e incrementale: la definizione di criteri di ammissibilità, la normalizzazione di formati e procedure, oppure la scelta tra alternative tecniche concorrenti richiedono meccanismi di coordinamento espliciti (meccanismi di voto, consenso, governance on-chain/off-chain) che spesso introducono attrito. Il rischio è che il sistema produca esiti **frammentati**, con la coesistenza di molte traiettorie parallele—talvolta complementari, ma talvolta ridondanti—e con difficoltà nel trasformare l’abbondanza di contributi in una roadmap coerente o in uno standard riconosciuto. In sintesi, l’assetto D_x **alto** / C_x **basso** massimizza la capacità esplorativa e la resilienza della validazione, ma può penalizzare la rapidità con cui la conoscenza viene *focalizzata, stabilizzata* e

trasformata in output consolidati, soprattutto quando il dominio richiede forte standardizzazione o decisioni architetture univoche.

Nelle **configurazioni più ibride**, in cui un D_x ancora relativamente elevato (e quindi un tessuto cooperativo diffuso) convive con un C_x più alto (segnale di una centralità maggiormente concentrata), il processo di produzione della conoscenza assume una specifica morfologia: **la generazione di contributi rimane ampia e distribuita**, ma una parte non trascurabile del **flusso informativo** tende a essere **strutturata e incanalata** da alcuni nodi che svolgono funzioni di coordinamento. In termini operativi, tali nodi centrali agiscono come *infrastrutture abilitanti* (repository, marketplace, layer di indicizzazione, strumenti di versioning e audit), come *standard setter* (formati, ontologie, procedure di review) e come *meccanismi di governance* (policy di ammissione, regole di reputazione, criteri di eleggibilità dei contributi). Il risultato è un sistema in cui la cooperazione non perde la propria natura reticolare, ma viene “messa a regime” attraverso elementi architetture che riducono la dispersione e rendono più prevedibile il percorso che trasforma un contributo grezzo in un output riconosciuto. A differenza del caso D_x alto / C_x basso — dove l’assenza di snodi forti può rendere più costosa la convergenza — qui la maggiore centralità **non elimina la varietà**, ma aumenta la capacità del sistema di **convertire tale varietà in risultati “ingegnerizzabili”**: output **interoperabili, prioritizzati e comunicabili**. L’esistenza di nodi più centrali consente infatti di: (i) **ridurre l’attrito di coordinamento**, offrendo interfacce comuni e regole di integrazione che limitano i costi di transazione tra attori eterogenei; (ii) aumentare la **continuità end-to-end** della pipeline, perché le fasi di produzione, validazione e pubblicazione risultano connesse da procedure standard; (iii) migliorare la **scalabilità organizzativa** del processo, rendendo più semplice gestire un volume elevato di contributi senza degradare la qualità del sistema. In altri termini, la centralità agisce come un dispositivo di *sintesi strutturale*: non sostituisce la creatività diffusa, ma la rende aggregabile e quindi trasferibile verso utilizzi successivi.

Tuttavia, tale aumento di capacità di orchestrazione introduce un trade-off non trascurabile in termini di **dipendenza e rischio sistemico**. Quando una quota significativa di circolazione, legittimazione o visibilità dei contributi passa attraverso pochi snodi, le scelte incorporate in quei nodi diventano determinanti nel definire *quale* conoscenza emerga come “rilevante” e *quale* resti periferica. Se tali criteri risultano subottimali (per bias, errore di design, incentivi mal allineati o semplice inerzia organizzativa), l’intero sistema può sperimentare una forma di **lock-in**: contributi potenzialmente validi possono essere sottovalutati o resi poco visibili, mentre percorsi di ricerca meno promettenti possono essere amplificati. In

questa condizione, l'errore può non essere corretto tempestivamente dal resto della rete perché, pur in presenza di cooperazioni diffuse, la funzione di selezione e di "messa in circolo" dipende in misura maggiore dalle decisioni dei nodi centrali, riducendo l'efficacia dei meccanismi di correzione distribuita. L'assetto ibrido mantiene quindi un'ampia base partecipativa, ma inserisce elementi di coordinamento che aumentano l'efficienza della selezione e della diffusione. Al contempo, proprio questa maggiore efficienza deriva da una concentrazione funzionale che può trasformarsi in vulnerabilità, poiché rende il processo più sensibile alle *policy* e alle scelte progettuali di pochi nodi.

Infine, le configurazioni in cui un D_x medio-basso ($D_x < 50\%$) si accompagna a un C_x basso ($C_x = 40\%$) descrivono reti che, dal punto di vista strutturale, risultano **simultaneamente non gerarchiche e poco connettive**: l'assenza di poli dominanti indica che non esistono attori in grado di esercitare un ruolo di *gatekeeping* o di coordinamento centrale, ma il valore contenuto di D_x suggerisce anche che la cooperazione complessiva **non raggiunge un livello di densità sufficiente** a sostenere processi collettivi complessi e continuativi. In queste condizioni, la produzione di conoscenza tende a organizzarsi in **micro-ecosistemi** relativamente autonomi — gruppi di lavoro, comunità tematiche o nicchie applicative — nei quali le interazioni sono localmente coerenti, spesso basate su affinità di competenze o obiettivi, ma risultano **debolmente interconnesse** a livello di sistema. Ne deriva un assetto frammentato: possono emergere contributi validi e anche innovativi all'interno di singole nicchie, tuttavia diventa più difficile trasformarli in output che attraversino l'intera value chain con continuità e che siano riconosciuti, riusati e consolidati su scala più ampia. L'impatto più critico si osserva nella fase di **validazione**, che in tali reti tende a essere meno "sistemica". In assenza di una cooperazione estesa, i meccanismi di controllo qualità e revisione si concentrano **entro i confini del singolo micro-gruppo**, riducendo la probabilità di revisioni incrociate tra ruoli differenti (ad esempio tra chi produce, chi cura, chi replica, chi valuta) e tra comunità con prospettive metodologiche diverse. Dal punto di vista epistemico, ciò implica una minore capacità di individuare errori, bias o assunzioni implicite, perché il controllo non beneficia della ridondanza e della diversità di valutatori che caratterizza reti più interconnesse. Inoltre, la mancanza di legami robusti può amplificare dinamiche per cui un gruppo può convergere rapidamente su una soluzione "soddisfacente" internamente, ma non necessariamente robusta se confrontata con standard o pratiche di comunità contigue.

Analogamente, anche le fasi di **diffusione della conoscenza** e di **correzione nel tempo** risentono in modo significativo della struttura. Da un lato, un C_x basso

implica l'assenza di un'infrastruttura centrale di sintesi che possa aggregare e rendere immediatamente accessibili i contributi prodotti nelle diverse nicchie. Dall'altro lato, un D_x contenuto indica che la rete cooperativa non possiede la connettività necessaria a **propagare rapidamente** feedback, aggiornamenti, patch, repliche o confutazioni tra comunità diverse. Ne consegue che l'aggiornamento della conoscenza tende a essere più lento e discontinuo: correzioni importanti possono rimanere confinate in un sottogruppo, oppure diffondersi solo dopo un ritardo significativo. Questa dinamica consente di chiarire un punto concettuale rilevante: **bassa centralizzazione non coincide automaticamente con maggiore efficacia epistemica**. In contesti in cui la cooperazione è limitata, l'assenza di hub non si traduce in resilienza distribuita, bensì può produrre una forma di **debolezza sistemica**: non c'è un nodo che concentri potere e, al contempo, non c'è una rete sufficientemente connessa che sostituisca quella funzione con un controllo collettivo. L'esito è una minore capacità di “scalare” la conoscenza come bene condiviso, verificabile e cumulativo, perché la produzione rimane localmente efficace ma globalmente poco integrata.

In sintesi, la combinazione *con* D_x **medio-basso** ($D_x < 50\%$) e C_x **basso** ($C_x < 40\%$) delinea reti in cui la conoscenza può nascere e svilupparsi per *isole*, ma fatica a diventare patrimonio comune del sistema: i contributi non mancano necessariamente di qualità, quanto piuttosto di **connettori strutturali** (relazionali e/o infrastrutturali) che ne permettano il consolidamento.

In generale quindi l'adozione della blockchain nel dominio scientifico non implica, di per sé, il raggiungimento di una decentralizzazione “totale”. Al contrario, l'evidenza emersa suggerisce che le piattaforme e i protocolli riconducibili alla DeSci tendono a configurarsi come **assetti ibridi**, nei quali componenti decentralizzate (registro distribuito, smart contract, meccanismi di governance on-chain) coesistono con **elementi accentrati** (interfacce, procedure operative, poteri decisionali residui in specifici attori). Ne deriva che la decentralizzazione osservabile è il risultato di scelte architetture e organizzative contingenti, più che una proprietà intrinseca della tecnologia: la blockchain può ridurre alcune dipendenze da intermediari, ma può anche essere integrata in infrastrutture che mantengono forme di controllo centralizzato.

Inoltre, come discusso nel capitolo 4.2, gli **outcome blockchain-based** — intesi come soluzioni plausibili alle criticità dell'attuale *knowledge value chain* — non si distribuiscono in modo uniforme lungo l'intera pipeline scientifica. Essi tendono piuttosto a concentrarsi su **specifiche porzioni del processo**, intervenendo su punti in cui la tecnologia offre un vantaggio comparativo: ad esempio, la **tracciabilità e il versioning** dei contributi, la **provenienza** dei dati, la **codifica**

esplicita di regole di accesso e utilizzo, oppure la **strutturazione di incentivi** e meccanismi di finanziamento coordinati. Di conseguenza, non tutte le fasi (creazione, validazione, archiviazione, distribuzione, applicazione) risultano ugualmente “toccate” o riconfigurate; alcune restano sostanzialmente governate da pratiche e infrastrutture tradizionali, mentre altre vengono parzialmente riprogettate.

La **selettività** degli interventi blockchain-based risulta dunque evidenziata dal fatto che l’adozione della blockchain conduce, nella maggior parte dei casi, a una **decentralizzazione parziale** e non generalizzata. Se gli outcome abilitati dalla tecnologia agissero in modo omogeneo su tutta la pipeline scientifica, ci si attenderebbe una riconfigurazione complessiva e coerente dell’intero processo di produzione della conoscenza. Al contrario, l’osservazione di **configurazioni ibride**, in cui solo alcuni moduli (ad esempio governance, finanziamento, tracciabilità, gestione degli accessi o remunerazione dei contributi) vengono effettivamente decentralizzati mentre altri rimangono affidati a componenti centralizzate, indica che la trasformazione avviene per **porzioni** e per **punti di intervento** mirati. La blockchain viene impiegata dove il suo vantaggio comparativo è maggiore, mentre risulta meno incisiva — o viene deliberatamente bypassata — nelle fasi in cui persiste la necessità di mediazione organizzativa, controllo qualità off-chain o gestione di asset non pienamente digitalizzabili.

5.2.2 Regione ammissibile

I valori degli indici C_x e D_x calcolati per ciascuna piattaforma sono qui interpretati come coordinate di un piano cartesiano, assumendo D_x come ascissa e C_x come ordinata.

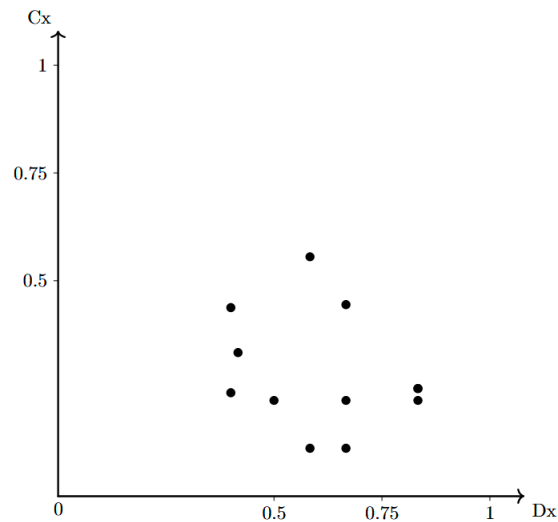


Figura 5.4 – Posizionamento dei casi studio

In questa prospettiva, ogni progetto può essere rappresentato come un punto nello spazio $(D_x; C_x)$, la cui posizione deriva direttamente dalle caratteristiche strutturali del grafo costruito a partire dalle relative schede di progetto. In tale grafo, gli attori della piattaforma corrispondono ai nodi, mentre le azioni da essi compiute sono rappresentate dagli archi; ne consegue che i valori assunti dagli indici dipendono dalla configurazione complessiva della rete, ossia dalla sua topologia e dal numero di attori coinvolti. Le combinazioni di coordinate ottenibili non sono quindi arbitrarie, ma risultano vincolate dalle proprietà del grafo sottostante. Nel grafico sopra riportato, i progetti non vengono distinti in funzione del diverso numero di attori presenti nelle piattaforme considerate; tuttavia, è opportuno evidenziare che, fissati in input il tipo di grafo e il numero di nodi, è possibile individuare e mappare l'insieme delle configurazioni potenzialmente ammissibili, come illustrato di seguito.

Come detto, uno dei risultati derivanti dalla compilazione delle schede di progetto per ciascuna piattaforma è stata la costruzione di un grafo orientato interconnesso, in cui ogni attore è stato modellato come nodo e ogni azione come arco entrante o uscente dal nodo stesso. Tale rappresentazione ha consentito di formalizzare in modo rigoroso le relazioni operative tra gli attori.

Le possibili combinazioni delle coordinate $(D_x; C_x)$ dipendono direttamente dalla configurazione topologica del grafo, in particolare dal numero di nodi n , ossia dal numero di attori operanti all'interno della piattaforma.

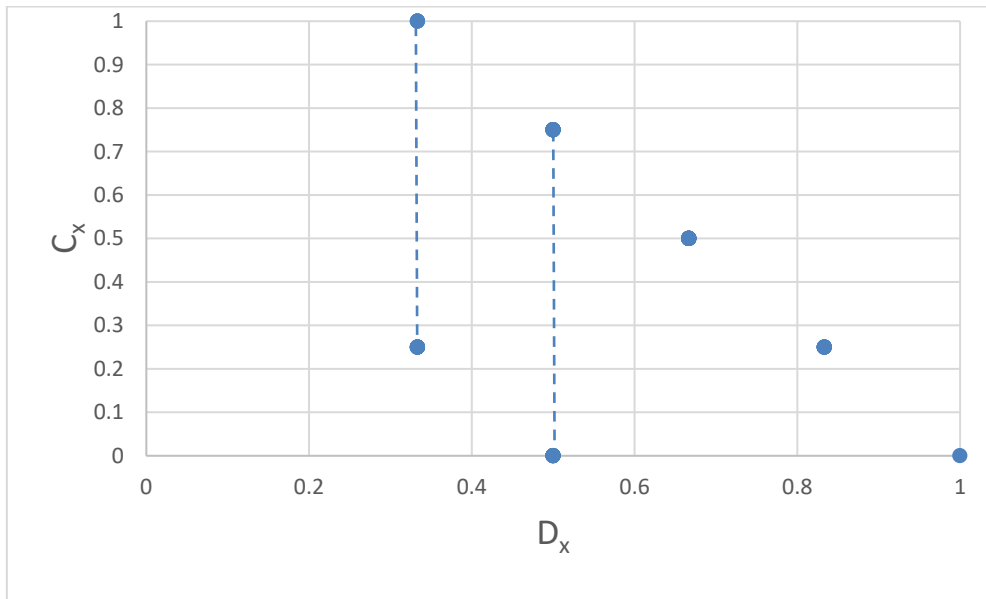


Figura 5.5 – Regione ammissibile con $N = 3$

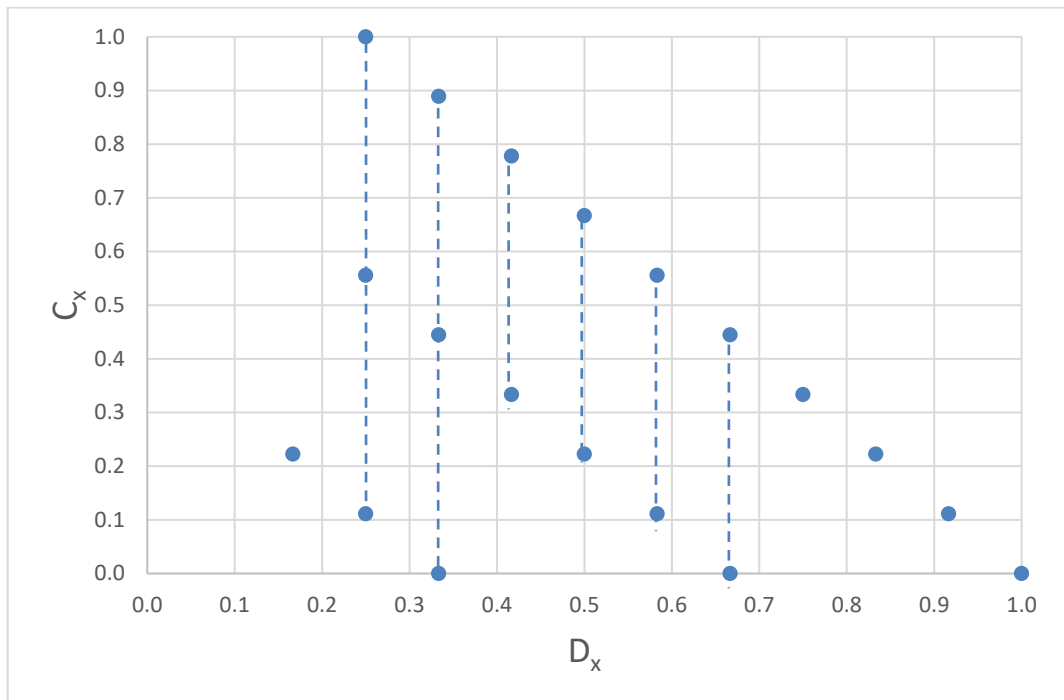


Figura 5.6 – Regione ammissibile con $N = 4$

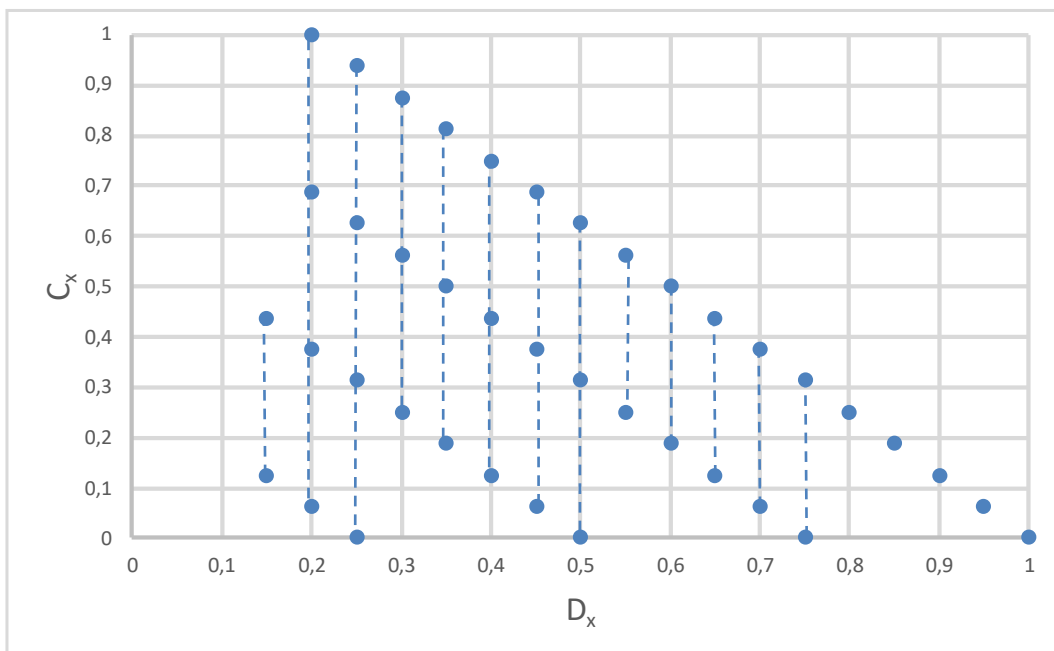


Figura 5.7 – Regione ammissibile con $N = 5$

I grafici riportati evidenziano un aspetto molto importante: per ogni valore fissato di n , ossia per ogni numero dato di attori presenti nella piattaforma, l'insieme delle combinazioni ammissibili delle coordinate $(D_x ; C_x)$ non si distribuisce come una superficie continua sul piano cartesiano, ma come un insieme discreto di punti. Questo dipende dal fatto che tali coordinate non derivano da variabili continue, bensì da strutture relazionali finite e combinatorie: ogni punto corrisponde infatti a una specifica configurazione del grafo, cioè a una particolare disposizione degli archi tra i nodi. In altri termini, dato un certo numero di attori, non tutte le coppie teoricamente immaginabili di valori $(D_x ; C_x)$ sono effettivamente realizzabili, ma solo quelle che corrispondono a una topologia concreta del grafo.

Questo elemento è particolarmente rilevante perché mostra che tra decentralizzazione e centralizzazione non esiste una relazione univoca o lineare. In effetti, per uno stesso valore di D_x possono comparire più valori di C_x . Ciò significa che piattaforme caratterizzate da un analogo grado di distribuzione delle interazioni o delle cooperazioni tra gli attori possono comunque presentare strutture interne molto diverse in termini di concentrazione della centralità. Due grafi possono quindi risultare simili sotto il profilo della decentralizzazione complessiva, ma differire sensibilmente per il modo in cui il potere relazionale, il coordinamento o la capacità di intermediazione risultano distribuiti tra i nodi. Questo conferma che i due indici colgono dimensioni diverse, seppur interrelate, della struttura organizzativa della piattaforma e che, proprio per questo, devono essere letti congiuntamente.

Dal punto di vista visivo, i grafici mettono dunque in luce una distribuzione puntiforme: per ogni ascissa D_x si osserva non un solo valore possibile di C_x , ma una pluralità di esiti. Tale pluralità riflette direttamente la varietà delle configurazioni topologiche compatibili con uno stesso livello di decentralizzazione. In questo senso, il piano $(D_x ; C_x)$ non rappresenta uno spazio continuo di possibilità astratte, ma una mappa delle sole configurazioni effettivamente generabili dalla struttura del grafo.

Tuttavia, questo carattere discreto tende a modificarsi progressivamente sul piano empirico e visivo al crescere di n .

All'aumentare del numero di attori, infatti, cresce in modo molto rapido anche il numero delle configurazioni topologiche possibili. Di conseguenza, aumenta il numero delle coppie $(D_x ; C_x)$ osservabili e i punti nel piano diventano sempre più numerosi e ravvicinati. Pur rimanendo matematicamente un insieme discreto, la nube di punti tende così a infittirsi fino ad assumere, a livello grafico, un aspetto che si avvicina a quello di una quasi-superficie continua. Per valori elevati di n ,

come nel caso $n = 50$, questo effetto è particolarmente evidente: la densità dei punti è tale da rendere meno immediatamente percepibile la natura discreta sottostante, dando l'impressione di una regione quasi piena del piano.

Nel complesso, questa evidenza rafforza un punto centrale dell'analisi: l'interpretazione dei valori di D_x e C_x non può essere svolta in modo isolato né assoluto, ma deve sempre essere contestualizzata rispetto alla dimensione del grafo considerato, cioè rispetto al numero di attori della piattaforma. Uno stesso punto o una stessa area del piano può infatti assumere significati diversi a seconda della numerosità degli attori e dell'ampiezza dello spazio topologico che tale numerosità rende disponibile. In altri termini, la struttura dimensionale della piattaforma non costituisce un semplice dato di sfondo, ma una condizione che incide direttamente sulla forma, sulla densità e sull'interpretazione dell'insieme delle combinazioni possibili tra decentralizzazione e centralizzazione.

Capitolo 6

Conclusioni

La presente tesi ha analizzato il paradigma della Decentralized Science (DeSci) come possibile risposta ad alcune criticità strutturali della *knowledge value chain* contemporanea, mettendo a fuoco il ruolo della blockchain non tanto come “promessa” astratta di decentralizzazione, quanto come infrastruttura capace di riconfigurare concretamente incentivi, tracciabilità e modalità di coordinamento nel processo di creazione della conoscenza. In coerenza con l’impianto introduttivo del lavoro, l’analisi si è sviluppata lungo un duplice binario: (RQ1) comprendere come l’adozione della blockchain influenzi qualitativamente le fasi di creazione, validazione, archiviazione, distribuzione e applicazione della conoscenza; (RQ2) misurare, in modo comparabile, il livello di decentralizzazione osservabile nelle principali piattaforme DeSci attraverso strumenti di network analysis.

Rispetto alla prima domanda di ricerca, l’esplorazione dell’ecosistema e la successiva formalizzazione in flowchart multilivello hanno evidenziato come la DeSci non sia un blocco omogeneo, ma un insieme di architetture eterogenee distribuite tra *base layer*, *protocol layer* e *application layer*, con una distinzione funzionale particolarmente rilevante tra *research layer* e *knowledge layer*. Il primo tende a incidere soprattutto su finanziamento, governance e conduzione di progetti scientifici (con forte ricorrenza nell’ambito bio/biotech); il secondo, invece, si focalizza sulla circolazione e valorizzazione dei dati, spesso tramite marketplace che non scambiano il “dato grezzo” come bene trasferibile, ma diritti d’uso e permessi computazionali (ad esempio logiche di *compute-to-data*). Questa distinzione è cruciale perché chiarisce che “decentralizzare la scienza” può significare cose diverse: ridurre dipendenze nella selezione e nel finanziamento della ricerca, oppure riprogettare il modo in cui i dati vengono archiviati, resi verificabili, monetizzati e riutilizzati.

Dalla ricostruzione delle criticità della catena del valore della conoscenza — asimmetria informativa, validazione sterile, rischio di scomparsa dei contributi e lentezza nella circolazione — sono emersi alcuni outcome blockchain-based ricorrenti. In primo luogo, l’introduzione di attori non tradizionali (cittadini, pazienti, community, micro-finanziatori) e la possibilità di partecipare a processi decisionali e di funding attraverso meccanismi programmabili (DAO, staking,

token di governance) ampliano la base di contributi potenziali e riducono, almeno in parte, la distanza tra produzione e fruizione del sapere. In secondo luogo, la provenienza verificabile dei contributi — sia economici sia scientifici — abilita nuove forme di accountability: il contributo non è più soltanto “dichiarato”, ma può essere registrato, ricondotto a un’identità crittografica e, in molti casi, associato a ricompense. In terzo luogo, i meccanismi di incentivo e monetizzazione introducono una remunerazione più granulare, che può valorizzare micro-azioni spesso non riconosciute nel sistema tradizionale (review, replica, gestione di dataset, sviluppo di tool). Infine, proprietà infrastrutturali come indirizzabilità univoca e versioning immutabile, insieme alla riduzione del time-to-publish e a modelli di accesso più “permissionless” garantiscono un archivio più robusto, maggiore tracciabilità delle versioni, e potenziale accelerazione del riuso. Complessivamente, il quadro qualitativo suggerisce che la blockchain tende a dare valore “subito” soprattutto quando viene usata per risolvere due problemi molto pratici che, nei sistemi tradizionali, generano attrito: **(i) coordinarsi** tra molti attori senza dover dipendere sempre da un’autorità centrale e **(ii) ricostruire con certezza cosa è successo** lungo il percorso di un contributo scientifico.

Sul primo punto, molte attività della ricerca funzionano grazie a regole che spesso non sono realmente esplicite o, anche quando lo sono, rimangono difficili da applicare in modo coerente. Chi decide come vengono allocati i fondi? Chi può accedere a un dataset e con quali condizioni? Come si stabilisce chi ha diritto di voto in una comunità? Con quali criteri si premiano contributi che non sono “paper” ma sono comunque essenziali, come una review, una replica, la pulizia di un dataset o lo sviluppo di un tool? In contesti tradizionali, queste decisioni sono frequentemente gestite da intermediari (istituzioni, piattaforme, comitati) e quindi dipendono da processi organizzativi lenti, talvolta opachi, o comunque basati sulla fiducia verso chi amministra il sistema. Quando invece le regole vengono implementate tramite smart contract, diventano più simili a un “regolamento operativo” che non resta sulla carta: è scritto in modo trasparente, applicabile automaticamente e uguale per tutti. In questo senso la blockchain produce un beneficio immediato perché riduce la frizione del coordinamento: le persone sanno in anticipo quali sono le condizioni del gioco (diritti, incentivi, governance) e possono partecipare senza dover negoziare ogni volta con un centro che autorizza, interpreta o fa rispettare le regole.

Il secondo punto riguarda la dimensione “storica” del lavoro scientifico. Nella ricerca non conta solo il risultato finale, ma anche la possibilità di ricostruire in modo affidabile il percorso: da dove arriva un dato, quando è stato creato, chi lo ha

modificato, quali versioni sono state usate in un'analisi, chi ha avuto accesso, con che permessi e in quale momento. Nel modello tradizionale, molte di queste informazioni restano frammentate tra repository diversi, email, piattaforme proprietarie e documentazione spesso incompleta; La blockchain, in questo contesto, può funzionare come una sorta di registro digitale: diventa verificabile che un certo contributo esisteva in una certa forma in una certa data, che una versione è successiva a un'altra, che un permesso è stato concesso o revocato. Anche qui il beneficio è immediato: la comunità può controllare la coerenza degli eventi senza basarsi solo su dichiarazioni o sull'affidabilità di un singolo intermediario.

Rispetto alla seconda domanda di ricerca, il contributo empirico della tesi è consistito nel calcolo e nell'applicazione congiunta di due indicatori strutturali — indice di centralità del grafo (C_x) e indice di decentralizzazione delle cooperazioni (D_x) — calcolati su grafi orientati costruiti attraverso un actors mapping sistematico: attori come nodi, relazioni operative come archi (elementary cooperations). Tale formalizzazione ha permesso di confrontare piattaforme eterogenee senza ridurre la decentralizzazione a una dicotomia, evidenziando invece configurazioni ibride in cui densità relazionale e concentrazione del potere strutturale possono coesistere. I risultati quantitativi hanno mostrato una variabilità significativa nel campione: D_x compreso tra circa 40% e 83,33%, e C_x tra circa 11% e 55,6%. Questa dispersione empirica supporta una conclusione centrale: molte piattaforme DeSci non si collocano su un unico asse “centralizzato → decentralizzato”, ma esibiscono trade-off differenti tra cooperazione diffusa e presenza di nodi con ruolo di snodo/coordination.

L'interpretazione per gruppi ha reso leggibile tale eterogeneità. Un primo insieme di progetti presenta D_x elevato e C_x basso: reti con molte cooperazioni e bassa dipendenza da un hub dominante, coerenti con un assetto più *peer-to-peer*. In questi casi, il potenziale vantaggio è una maggiore resilienza e un'ampia capacità esplorativa; il costo possibile è la difficoltà di convergere rapidamente verso standard, priorità e decisioni condivise, poiché l'orchestrazione non è “naturalmente” concentrata. Un secondo gruppo occupa una regione intermedia (D_x medio-alto con C_x medio): qui la densità delle interazioni convive con nodi più centrali, configurando un modello in cui l'infrastruttura o alcuni attori svolgono funzioni di raccordo e riduzione dei costi di coordinamento. Questa forma ibrida può risultare più efficiente nella selezione, nell'organizzazione e nella scalabilità operativa, ma introduce rischi di lock-in e dipendenza da scelte progettuali di pochi snodi. Infine, un terzo gruppo evidenzia D_x più contenuto e C_x generalmente basso:

reti non particolarmente gerarchiche ma poco interconnesse, compatibili con ecosistemi ancora in consolidamento, comunità piccole o architetture verticali; in tali casi, il limite principale non è la centralizzazione, bensì la debolezza relazionale complessiva, che può ridurre la capacità di propagare rapidamente feedback, validazione e riuso.

Un ulteriore elemento rilevante — e spesso trascurato quando si interpretano metriche di rete — è emerso nell’analisi della *regione ammissibile* delle coppie $(D_x ; C_x)$. Le combinazioni ottenibili non sono arbitrarie: dipendono dal tipo di grafo e, in particolare, dal numero di nodi N (attori) del sistema. Per ciascun N , lo spazio delle coppie possibili non è una superficie continua, ma un insieme discreto di punti; all’aumentare di N , tale insieme tende a infittirsi e ad approssimare visivamente una quasi-superficie. Questo risultato ha una conseguenza interpretativa importante: confrontare valori di $(D_x ; C_x)$ tra piattaforme con numerosità di attori molto diversa richiede cautela, perché parte delle differenze osservate può riflettere vincoli combinatori e topologici, non soltanto scelte di governance o design. In altre parole, l’analisi quantitativa non restituisce soltanto un “posizionamento” delle piattaforme, ma anche un vincolo strutturale che delimita ciò che è matematicamente ottenibile.

Alla luce di quanto emerso, la tesi consente di formulare alcune implicazioni generali. Primo, la DeSci appare più convincente quando viene letta come **tecnologia di coordinamento** (regole esplicite, incentivi programmabili, tracciabilità end-to-end) piuttosto che come promessa ideologica di decentralizzazione totale. Secondo, decentralizzazione e centralizzazione non sono grandezze perfettamente speculari: sistemi con molte interazioni possono comunque esibire nodi centrali (e viceversa), e l’efficacia epistemica non coincide automaticamente con la riduzione della centralità. Terzo, l’adozione di blockchain tende a generare valore soprattutto nelle fasi in cui i sistemi tradizionali soffrono di attriti informativi e organizzativi: attribuzione dei contributi, gestione delle versioni dei contributi e trasparenza dei processi.

In conclusione, la DeSci emerge come un spazio di sperimentazione istituzionale e tecnologica in cui blockchain, smart contract e tokenomics non sostituiscono automaticamente le istituzioni della scienza, ma ne rimettono in discussione alcune funzioni chiave—finanziamento, validazione, archiviazione, distribuzione—rendendo più osservabili i trade-off tra efficienza e apertura, tra governance e resilienza, tra standardizzazione e pluralità. Il framework integrato proposto fornisce strumenti per discutere tali trade-off in modo meno normativo e

più misurabile, contribuendo a distinguere la decentralizzazione dichiarata dalla decentralizzazione effettivamente raggiunta nelle architetture operative delle piattaforme analizzate.

Bibliografia

- Alharby, Maher, e Aad Van Moorsel. 2017. «Blockchain Based Smart Contracts : A Systematic Mapping Study». *Computer Science & Information Technology (CS & IT)*, agosto 26, 125–40.
- Benos, Evangelos, Rod Garratt, e Pedro Gurrola-Perez. 2017. «The Economics of Distributed Ledger Technology for Securities Settlement». *SSRN Electronic Journal*, pubblicazione online ad accesso anticipato.
- Brekke, J. K. and Fischer, A. 2020. «*digital scarcity*».
- Business Innovation Through Blockchain*. 2017. Springer International Publishing.
- Buterin, V. 2015. «*on public and private blockchains*».
- Edwood. 2020. *proof-of-work vs. proof-of-stake: soluzioni per scalare le blockchain*.
- Efanov, Dmitry, e Pavel Roschin. 2018. «The All-Pervasiveness of the Blockchain Technology». *Procedia Computer Science* 123: 116–21.
- Freni, P. 2020. *tokens classification: a morphological framework*.
- Goodman, E. P. 2004. *Media policy out of the box: Content abundance, attention scarcity, and the failures of digital markets*.
- Lamport, Leslie, Robert Shostak, e Marshall Pease. 2019. «The Byzantine Generals Problem». *ACM Transactions on Programming Languages and Systems* 4 (3).
- Miller, Andrew. 2019. «Permissioned and Permissionless Blockchains». In *Blockchain for Distributed Systems Security*, 1^a ed., a cura di Sachin Shetty, Charles Kamhoua, e Laurent Njilla. Wiley.
- Nakamoto, Satoshi. 2008. *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*.
- Natarajan, Harish, Solvej Krause, e Helen Gradstein. 2017. *Distributed Ledger Technology and Blockchain*. World Bank, Washington, DC.

Oliva, Gustavo A., Ahmed E. Hassan, e Zhen Ming Jiang. 2020. «An Exploratory Study of Smart Contracts in the Ethereum Blockchain Platform». *Empirical Software Engineering* 25 (3): 1864–904.

Soldavini, P. 2020. *il bitcoin pronto all'«halving»: saranno dimezzati i compensi per i miners.*

Szabo. 1996. *Smart Contracts: Building Blocks for Digital Markets.*