



Politecnico di Torino

Collegio di Ingegneria Gestionale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Anno accademico 2024-2025

Studio sul mercato delle terre rare: contesto,
domanda e offerta

Relatori:

Prof.ssa Laura Abrardi

Candidati:

Guglielmo Tomaselli

INDICE

1	INTRODUZIONE	5
2	IL CONTESTO DI MERCATO.....	7
2.1	Definizione e caratteristiche del mercato	7
2.2	Panoramica globale.....	9
2.3	Evoluzione storica e tendenze attuali.....	10
2.4	Tendenze future	11
2.5	Associazioni e categorie di settore.....	12
3	ANALISI DELLA DOMANDA.....	13
3.1	Segmentazione del mercato	13
3.2	Comportamento e preferenze dei consumatori e fattori che influenzano la domanda.....	14
3.3	Previsioni di crescita della domanda.....	15
3.4	Elasticità della domanda rispetto al prezzo	16
3.5	Beni sostituti.....	16
4	ANALISI DELL'OFFERTA.....	18
4.1	Principali attori.....	18
4.1.1	Cina	18
4.1.2	Australia	18
4.1.3	Stati Uniti.....	18
4.2	Struttura dei costi	19
4.3	Barriere all'ingresso.....	20
4.4	Innovazione tecnologica	21
4.5	Catena del valore	22
5	ANALISI ECONOMICO-FINANZIARIA DEL MERCATO	24
5.1	Dimensioni del mercato e quote di mercato	24
5.2	Tipologia di concorrenza e strategie di prezzo	25
5.3	Marginalità e redditività delle imprese	26
6	REGOLAMENTAZIONE E FATTORI ESTERNI	28
6.1	Normative e regolamentazione	28
6.2	Politiche governative e incentivi.....	29
6.3	Impatto ambientale e sostenibilità.....	30
6.3.1	Il caso del Myanmar	30
6.4	Evoluzione tecnologica	31
7	CONCLUSIONI.....	32

8	RINGRAZIAMENTI.....	34
9	BIBLIOGRAFIA.....	35

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Andamento del prezzo in CNY/tonnellata di NdPr 2006-2022 [4]	8
Figura 2 – Produzione globale di REE nel 2024 [tonnellate di REO equivalenti] [2]	9
Figura 3 - Capacità di raffinazione globale di REE nel 2020 [12]	10
Figura 4 - Consumo globale di REE per utilizzo finale [15]	13
Figura 5 – Previsioni andamento domanda globale di Praseodimio-Neodimio [14]	15
Figura 6 – Dimensioni attuali e previste del mercato globale delle terre rare (solo fasi a monte) in miliardi di dollari [21]	16
Figura 7 - Domanda e offerta globali di NdPr [26]	19
Figura 8 - Costi operativi totali delle fasi di estrazione, raffinazione e separazione per tipologia di prodotto [31]	20
Figura 9 - Fasi della catena del valore [37]	22
Figura 10 - Catena del valore futura	23
Figura 11 – Suddivisione capacità globale di estrazione, di raffinazione e di riciclo delle REE nel 2022-2023 [40]	24
Figura 12 – Andamento del prezzo del NdPr [28]	26
Figura 13 – Obiettivi del CRMA [16]	28

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 – Lista delle terre rare trovate nei giacimenti naturali [1]	7
Tabella 2 - Consumo di acqua ed energia nella produzione delle terre rare [13]	12
Tabella 3 - Costi lungo la filiera del mercato delle terre rare [30].....	20

1 INTRODUZIONE

Le terre rare (REE) sono un gruppo di elementi fondamentali per lo sviluppo tecnologico globale, la rilevanza strategica di questi minerali è stata gradualmente riconosciuta da molti governi nazionali e assicurarsi forniture di REE per alimentare la propria industria è diventata una priorità per molti.

Nonostante il loro nome le terre rare non scarseggiano in termini di abbondanza nella crosta terrestre, ciò che le rende “rare” è la difficoltà nel trovarle in concentrazioni tali da rendere profittevole la loro estrazione. Questo vincolo sulla presenza di giacimenti adatti all'estrazione ha portato molti paesi a importare questi materiali dalla Cina, che è arrivata a ricoprire una posizione quasi monopolistica nel settore.

L'avanzare della transizione energetica, lo sviluppo dell'intelligenza artificiale e delle tecnologie digitali sono tutti fattori che alimentano una domanda di terre rare caratterizzata da una crescita costante e recentemente quasi vertiginosa. Sebbene la domanda in crescita possa risultare incentivante per l'ingresso nel mercato, la concentrazione di materie prime e tecnologie in Cina pone forti barriere all'ingresso che per anni hanno reso il mercato statico e poco diversificato.

Lo strapotere cinese negli ultimi anni è stato fonte di grande incertezza per quanto riguarda la sicurezza delle forniture e la stabilità del mercato, ma è anche diventato un incentivo alla diversificazione e ad investire per lo sviluppo di soluzioni e tecnologie innovative che possano smuovere gli equilibri del mercato.

La nuova percezione dell'importanza di questi minerali ha reso dinamico, oltre che il mercato stesso, anche la sua regolamentazione e le politiche governative ad esso legate. Decreti come il *Critical Raw Materials Act* europeo e il *Critical Minerals Security Act* sono una prova tangibile dell'attenzione internazionale sia rivolta a questo settore.

Dal punto di vista ambientale l'impatto delle terre rare è altrettanto significativo, se da un lato permettono la produzione di gran parte delle tecnologie vitali per la transizione energetica e per uno sviluppo sociale più green, dall'altro le loro lavorazioni sono altamente inquinanti e dannose. L'adozione di tecnologie per migliorare tali lavorazioni e per rendere più efficiente il riciclo giocherà un ruolo vitale nel passaggio ad una industria e società più eco-friendly.

Il presente lavoro analizzerà il mercato delle terre rare esaminandone sia la domanda che l'offerta, le politiche pubbliche, le normative e le dinamiche di sostenibilità. In seguito ad un inquadramento generale verrà analizzata la domanda, con attenzione alla segmentazione dei consumatori e ai fattori che ne determinano la crescita. Sarà poi studiata l'offerta considerando i principali attori, la struttura dei costi e le barriere all'ingresso. Successivamente verranno esaminate le normative, le politiche governative e le innovazioni tecnologiche che stanno trasformando il settore. Infine, saranno affrontati i temi dell'impatto ambientale e delle prospettive future.

L'obiettivo di questo studio è fornire un quadro complessivo degli andamenti del settore, esaminandolo nelle sue diverse sfaccettature ed evidenziando sfide ed opportunità di un mercato destinato a ricoprire un ruolo centrale nell'economia globale.

2 IL CONTESTO DI MERCATO

2.1 Definizione e caratteristiche del mercato

Le terre rare sono diciassette elementi, visibili in *Tabella 1*, richiesti per la realizzazione di svariati prodotti come smartphones, computer e fibra ottica. Ciò che però rende il mercato delle terre rare oggetto di grande attenzione da parte dei governi delle principali potenze globali è il loro utilizzo nella produzione di magneti permanenti, componenti vitali per il settore sanitario, della difesa e della transizione energetica. Il largo uso in tutti questi campi di applicazione sta dando al loro mercato una crescente rilevanza strategica ed economica.

Tabella 1 – Lista delle terre rare trovate nei giacimenti naturali [1]

Elemento	Simbolo	Tipologia
Lantano	La	Terre rare leggere (LREE)
Cerio	Ce	Terre rare leggere (LREE)
Praseodimio	Pr	Terre rare leggere (LREE)
Neodimio	Nd	Terre rare leggere (LREE)
Samario	Sm	Terre rare leggere (LREE)
Europio	Eu	Terre rare leggere (LREE)
Gadolinio	Gd	Terre rare leggere (LREE)
Terbio	Tb	Terre rare pesanti (HREE)
Disprosio	Dy	Terre rare pesanti (HREE)
Olmio	Ho	Terre rare pesanti (HREE)
Erbio	Er	Terre rare pesanti (HREE)
Tulio	Tm	Terre rare pesanti (HREE)
Itterbio	Yb	Terre rare pesanti (HREE)
Lutezio	Lu	Terre rare pesanti (HREE)
Ittrio	Y	Terre rare pesanti (HREE)

Il monopolio cinese di queste risorse è stato fonte di diversi attriti geo-politici, portando l'UE e gli USA a cercare di ridurre la loro dipendenza dal colosso asiatico. Questi recenti

provvedimenti governativi rendono il mercato delle terre rare molto dinamico, con costanti investimenti effettuati dalle principali aziende di estrazione e raffinazione di questi minerali.

Nel 2023-2024 la dimensione del mercato globale delle terre rare era di compresa tra i 3,4 miliardi di dollari [5] considerando solo le fasi upstream e i 12,44 [39] se si considerano anche i processi downstream, si prevede un aumento di tali valori dovuto alla crescente domanda di prodotti la cui produzione richiede le REE come materie prime.

Le terre rare non si trovano in forma pura, per questo motivo la loro estrazione è legata alla presenza di giacimenti di minerali contenenti le terre rare, come bastnaesite, monazite e xenotimo. Una volta estratti, si procede con l'isolamento delle REE che può avvenire tramite diversi processi, queste lavorazioni hanno un forte impatto ambientale poiché emettono prodotti tossici e in certi casi radioattivi. Le terre rare separate possono essere vendute come di concentrati in polvere o, in seguito a ulteriori lavorazioni, come ossidi o metalli più puri.

Gli elementi la cui richiesta è più in crescita sono Neodimio e Praseodimio sotto forma di lega NdPr, questa lega è usata nella produzione di magneti permanenti ad alte prestazioni (NdFeB) la cui produzione è la principale fonte di domanda di REE. Il prezzo finale dei magneti permanenti è fortemente influenzato dal prezzo di NdPr, il che ha portato il mercato delle terre rare ad essere caratterizzato da una forte integrazione verticale o da strette collaborazioni tra attori in livelli diversi della catena del valore.

Le forniture di terre rare negli ultimi anni sono state fortemente influenzate dalla condizione geo-politica globale; la dipendenza di gran parte delle supply chain globali dalle esportazioni cinesi ha portato il colosso asiatico a strumentalizzare il fabbisogno di REE, come successo nel 2010 con la *Rare Earth Crisis* in cui, in seguito ad un incidente diplomatico, la Cina interruppe momentaneamente le esportazioni di terre rare verso il Giappone. [3]

Per queste ragioni, il prezzo delle terre rare è caratterizzato da un'elevata volatilità, come mostrato in *Figura 1*:

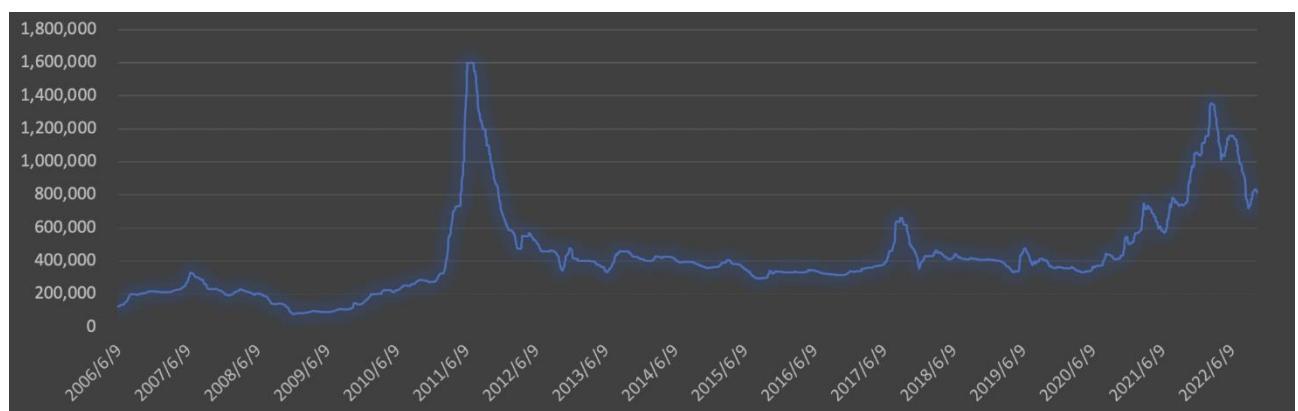


Figura 1 - Andamento del prezzo in CNY/tonnellata di NdPr 2006-2022 [4]

2.2 Panoramica globale

Attualmente la Cina, tramite società di proprietà statale, è il maggiore produttore globale di terre rare; la sua capacità produttiva surclassa quella di tutti gli altri paesi nel mercato e le permette di essere il principale price maker di questi materiali. Inoltre, l'industria cinese si è fortemente specializzata nelle lavorazioni che raffinano le terre rare e nella produzione dei prodotti finiti da esse dipendenti, questo ha reso estremamente solida la sua posizione di leadership nel settore.

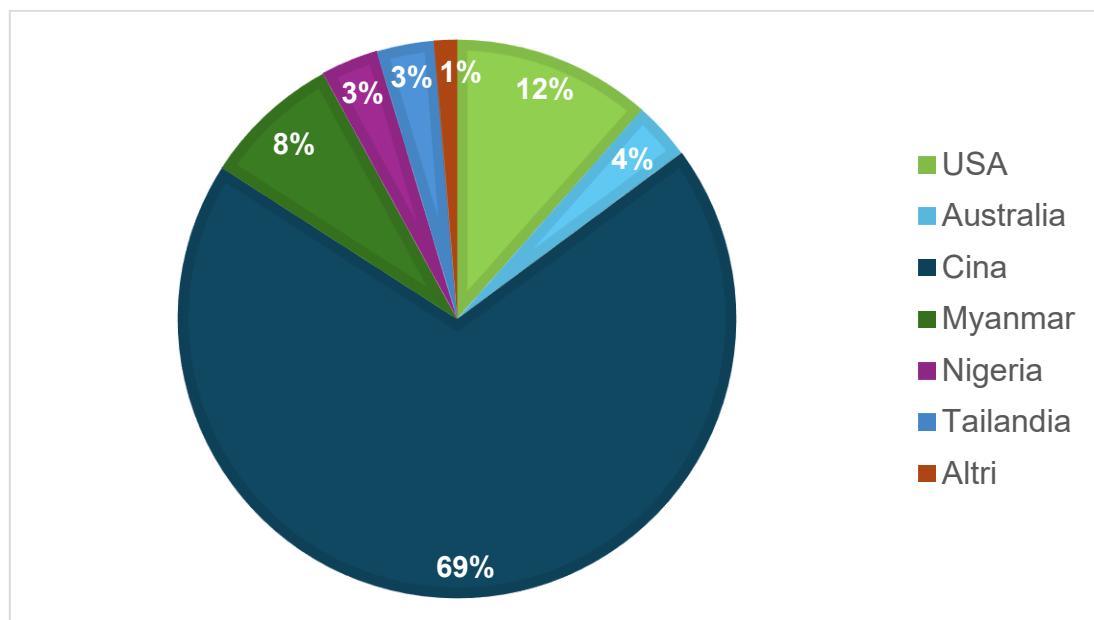


Figura 2 – Produzione globale di REE nel 2024 [tonnellate di REO equivalenti] [2]

Il secondo produttore mondiale sono gli Stati Uniti che, sebbene ancora lontani dalla capacità produttiva cinese, possono sfruttare la presenza di ricchi giacimenti nel loro territorio. Contrariamente alla forte statalizzazione dell'industria cinese, quella americana si affida a società controllate da privati ma fortemente sovvenzionate dal governo negli anni più recenti.

Seguono rispettivamente Myanmar e Australia, il primo esporta gran parte della propria produzione in Cina, alimentando la sua industria altamente specializzata nella raffinazione delle REE. L'Australia rappresenta una delle principali alternative mondiali alle forniture cinesi per quanto riguarda la raffinazione delle terre rare, l'industria australiana è stata infatti l'unica insieme a quella cinese ad investire in tecnologie per la separazione delle REE.

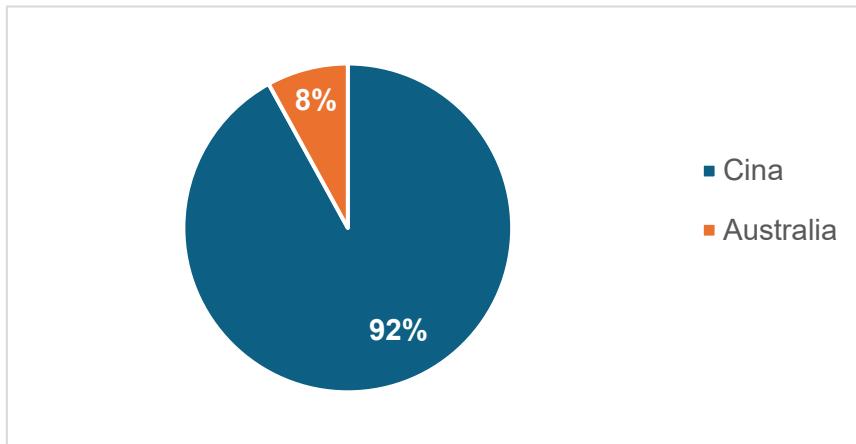


Figura 3 - Capacità di raffinazione globale di REE nel 2020 [12]

2.3 Evoluzione storica e tendenze attuali

Nel 1950 gli Stati Uniti erano il principale produttore mondiale di terre rare, grazie allo sfruttamento del giacimento di Mountain Pass. Nel 2002 la chiusura di Mountain Pass, dovuta a problemi ambientali, segnò la fine del dominio statunitense e l'ascesa della Cina come nuovo leader globale del settore.

Tramite una progressiva riduzione delle esportazioni delle REE il paese asiatico è riuscito ad attrarre diverse compagnie straniere nel proprio territorio, migliorando la propria industria e permettendo lo sviluppo di prodotti con un maggiore valore aggiunto, fino ad arrivare ad una posizione di monopolio nell'estrazione e raffinazione delle terre rare.

In seguito alla Rare Earth crisis nel 2010 si è sviluppata una consapevolezza globale, dipendere interamente dalla Cina mette a rischio le supply chain; inoltre, la crisi ha portato ad un forte aumento dei prezzi delle terre rare.

Questo evento ha dato via ad una serie di progetti di diversi paesi per ridurre la propria dipendenza dalle esportazioni cinesi, come la riapertura del giacimento di Mountain Pass e la scoperta di giacimenti precedentemente sconosciuti. La nuova produzione, in termini di estrazione mineraria, degli altri paesi ha sottratto delle quote di mercato alla Cina, che ha però mantenuto salda la posizione di monopolio nella fase di raffinazione.

In risposta all'inserimento nel mercato di compagnie estere lo stato cinese ha investito nei propri giacimenti di terre rare pesanti (HREE), più difficili da trovare rispetto a quelli di terre rare leggere (LREE), diventando l'unico paese con la capacità industriale di lavorare le HREE. Inoltre, tramite joint ventures, share holding e outsourcing, le compagnie cinesi sono coinvolte nell'estrazione e lavorazione di terre rare anche in paesi come Myanmar, Tanzania e Madagascar. Grazie a queste strategie la Cina è riuscita a mantenere la sua posizione di predominio sul mercato globale delle terre rare. [6]

Attualmente le strategie dei vari paesi per rendere le proprie compagnie competitive e garantire stabilità alle supply chain dipendenti dalle REE sono molto diversificate, in particolare nei tre paesi produttori più importanti:

- La Cina è caratterizzata da grandi gruppi di estrazione e raffinazione che, unendo al loro interno tutte le compagnie operanti in una determinata zona del paese come nel caso di China Northern Rare Earth Group e China Rare Earth Group, forniscono enormi volumi di materiale da dedicare alla domanda interna del paese e alle esportazioni. La presenza di gruppi estesi integrati sia verticalmente che orizzontalmente e tutti sotto il controllo statale rende l'industria cinese del settore solida e fortemente controllata.
- Negli USA gli incentivi governativi stanno aiutando lo sviluppo e la crescita di diverse compagnie caratterizzate da una forte integrazione verticale, che permette loro di gestire internamente tutti i processi dall'estrazione delle REE fino alla produzione dei magneti che le contengono. [7, 8]
- In Australia Lynas Rare Earths e Iluka, due delle principali compagnie del settore, stanno investendo nell'espansione della loro capacità di estrazione e raffinazione di terre rare sia leggere che pesanti. [9, 10]

2.4 Tendenze future

Il settore delle terre rare non è fermo dal punto di vista della ricerca, in particolare nel riciclaggio.

La crescita della domanda, il forte impatto ambientale dell'estrazione dai giacimenti e la volontà dei vari paesi di garantire una produzione locale di terre rare, sono fattori che rendono il recupero delle REE dai rifiuti estremamente rilevante. Per tale ragione le cosiddette "miniere urbane" saranno un'importante fonte di terre rare negli anni futuri.

Il recupero di terre rare può essere effettuato partendo dagli scarti delle lavorazioni o da prodotti finiti che hanno completato il loro ciclo vitale. Il secondo è quello più rilevante, prodotti come magneti e batterie possono essere riciclati e permetterebbero di riottenere materiali ad un costo accessibile e con la possibilità di ridurre l'impatto ambientale di questi prodotti.

Lo sviluppo delle tecniche di riciclaggio è stato marginale per anni, nel 2011 solo l'1% delle REE veniva ricavato tramite riciclaggio a causa del basso livello di prestazioni offerto dalle terre rare ottenute mediante il recupero, ma con l'evoluzione di lavorazioni come la idrometallurgia e biometallurgia adesso è possibile ricavare prodotti caratterizzati da una buona efficienza. [6, 11]

Tabella 2 - Consumo di acqua ed energia nella produzione delle terre rare [13]

	Materiale estratto	Materiale riciclato
Consumo energetico [MJ per kg]	5500-7200	1000-5000
Acqua consumata [m ³ per tonnellata]	1275-1800	250-1250

2.5 Associazioni e categorie di settore

Il mercato delle terre rare a livello globale non è regolamentato da nessun ente, nonostante questo sono presenti associazioni e organizzazioni volte a promuovere strategie ed obiettivi che le compagnie del settore dovrebbero perseguire.

A livello globale è presente la Rare Earth Industry Association (REIA), un'organizzazione non-profit che mira ad uno sviluppo sostenibile della catena del valore delle terre rare; ne fanno parte diversi protagonisti del mercato globale delle REE, fatta eccezione per i gruppi cinesi.

In Cina, infatti è presente la China Nonferrous Industry Association (CNIA), tale associazione promuove la crescita del mercato domestico e svolge la funzione di collegamento tra il governo nazionale e l'industria dei materiali non ferrosi, tra cui quella delle terre rare.

Un altro ente con una forte influenza sul mercato, sebbene non direttamente coinvolto in esso, è l'European Raw Materials Alliance (ERMA). Creato dalla commissione europea, ha come obiettivo ridurre la dipendenza dell'UE dalle esportazioni estere di materiali critici per le supply chain, tra questi materiali critici sono incluse le REE.

Una funzione simile è assolta negli USA dal Department of Energy (DOE), che si fa promotore tramite incentivi e fondi governativi, di progetti per favorire la crescita dell'industria delle terre rare statunitense.

3 ANALISI DELLA DOMANDA

3.1 Segmentazione del mercato

Le terre rare sono usate nella produzione di diversi prodotti come mostrato in *Figura 4*, spesso legati alla transizione energetica e alla digitalizzazione, ciò rende questi elementi fondamentali per la crescita e lo sviluppo tecnologico.

In particolare, la produzione dei magneti permanenti è la principale fonte di domanda di terre rare, questi magneti sono necessari per la produzione delle turbine eoliche e dei motori per auto ibride ed elettriche.

Il secondo campo di applicazione è quello dei catalizzatori, strumenti ampiamente utilizzati in diversi settori: per ridurre le emissioni e aumentare l'efficienza del carburante negli autoveicoli, nei processi di raffinazione nel settore petrolchimico e nella produzione di gomma e semiconduttori.

Altri ambiti caratterizzati da una grande domanda di REE sono quello della produzione del vetro, in cui le terre rare garantiscono particolari proprietà ottiche e colorazioni, della metallurgia e della lucidatura.

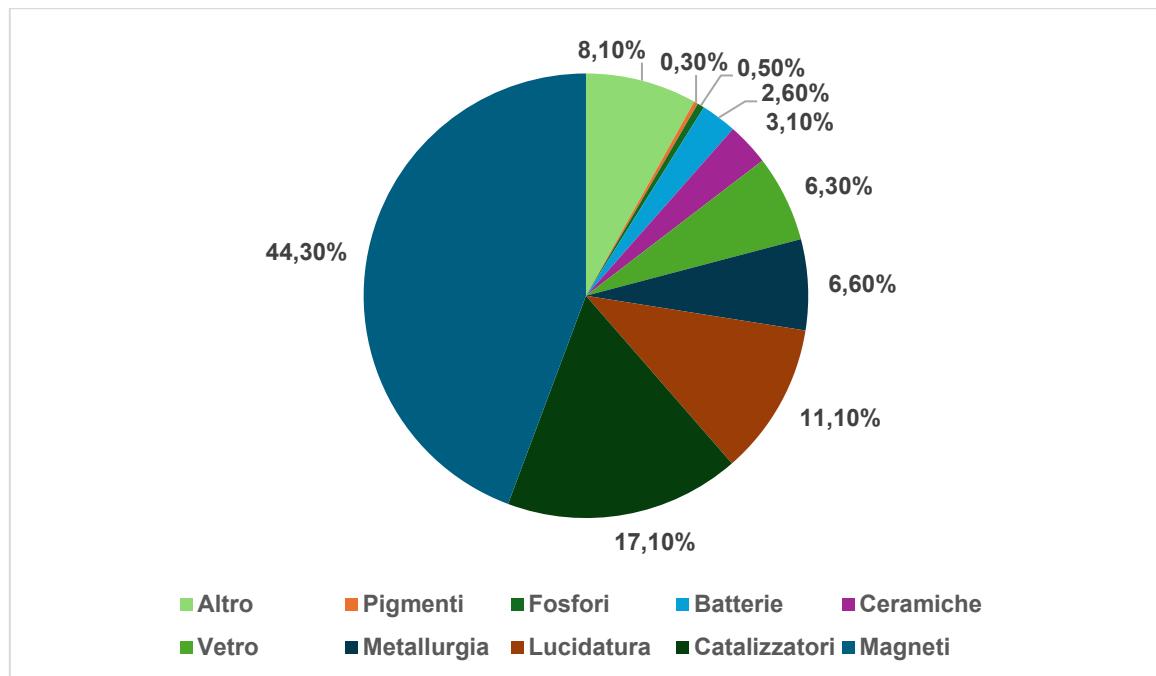


Figura 4 - Consumo globale di REE per utilizzo finale [15]

I maggiori importatori di terre rare sono i paesi asiatici, in particolare la Cina che, nonostante sia anche il maggiore produttore ed esportatore, deve alimentare un'industria fortemente specializzata in tutti i livelli della supply chain legati alle REE. Questo rende il colosso asiatico il principale consumatore globale di questi elementi. Segue il Giappone, la cui industria forte nella produzione di dispositivi digitali e high-tech, richiede un elevato consumo di terre rare.

Gli Stati Uniti, insieme a Giappone e Cina sono l'altro maggiore consumatore globale di REE, ma rispetto ai paesi asiatici importano una percentuale minore; ciò è dovuto al fatto che i giacimenti domestici sono sufficienti per soddisfare l'industria statunitense della raffinazione e dei prodotti derivati dalle terre rare la cui capacità produttiva è inferiore rispetto a quella cinese. [15]

I paesi dell'Unione Europea, non essendoci giacimenti in uso nell'UE, importano il 100% del proprio fabbisogno soprattutto dalla Cina, da cui vengono contemporaneamente importati anche semilavorati e prodotti finiti. [16, 17]

3.2 Comportamento e preferenze dei consumatori e fattori che influenzano la domanda

Attualmente le terre rare sono spesso strettamente legate alla produzione di componenti e prodotti finiti che spesso, nei rispettivi campi e mercati, garantiscono le prestazioni migliori.

Nonostante questo, quando possibile i consumatori dell'industria civile, a causa dell'instabilità della supply chain e dei prezzi delle terre rare legata alla mutabile situazione geopolitica, stanno cercando di ridurre o eliminare la concentrazione di terre rare nei loro prodotti al fine di garantire una maggiore stabilità alle loro linee produttive.

Il desiderio di avere una supply chain stabile spinge l'industria civile a preferire forniture di terre rare provenienti da paesi diversi dalla Cina, la priorità attuale di questi consumatori non è acquistare le REE al prezzo più basso disponibile, ma assicurarsi forniture sicure e affidabili. Per farlo sono disposti a pagare cifre fino al 30% superiori rispetto al prezzo proposto dalle compagnie cinesi. [19]

Il settore della difesa è invece meno influenzato da queste dinamiche poiché, essendo un mercato di dimensioni minori, richiede volumi di REE ridotti rispetto a quello dell'industria civile. Questo permette a questo settore di non rischiare interruzioni lungo le sue supply chain anche in caso di scarsa disponibilità di questi minerali. [18]

Il mercato delle terre rare, nel suo essere strettamente legato allo stato geopolitico globale, è fortemente influenzato dalle decisioni dei governi, in particolare quello cinese.

Le strategie della Cina per tenere saldo il proprio primato nel settore portano cambiamenti significativi nel prezzo e nella disponibilità di REE, come dimostrato dalla recente decisione del governo cinese di controllare le esportazioni di terre rare pesanti e di magneti permanenti contenenti disproprio e altri elementi appartenenti alle REE. [20]

In risposta a questo rigido controllo le compagnie che necessitano di terre rare possono spostare la loro produzione in Cina o assicurarsi forniture da altri paesi, ma spesso a prezzi più alti.

Inoltre, vi sono anche fattori sociali e di sostenibilità ambientale che possono portare i consumatori a cercare soluzioni non richiedenti terre rare nei loro processi produttivi o

prediligere le REE ottenute mediante il riciclaggio, così da non dipendere dall'estrazione di REE che è un processo estremamente inquinante.

3.3 Previsioni di crescita della domanda

La crescita dei settori legati alla transizione energetica e alla mobilità elettrica comporta una crescita del mercato delle terre rare, si prevede che nel 2032-2033 il mercato della mobilità elettrica e quello dell'energia eolica insieme costituiranno il 55% della domanda di disporio e terbio e circa il 46% della domanda di neodimio e praseodimio. Inoltre, i magneti costituiranno il 27% della domanda globale di ossidi di terre rare. [8, 14]

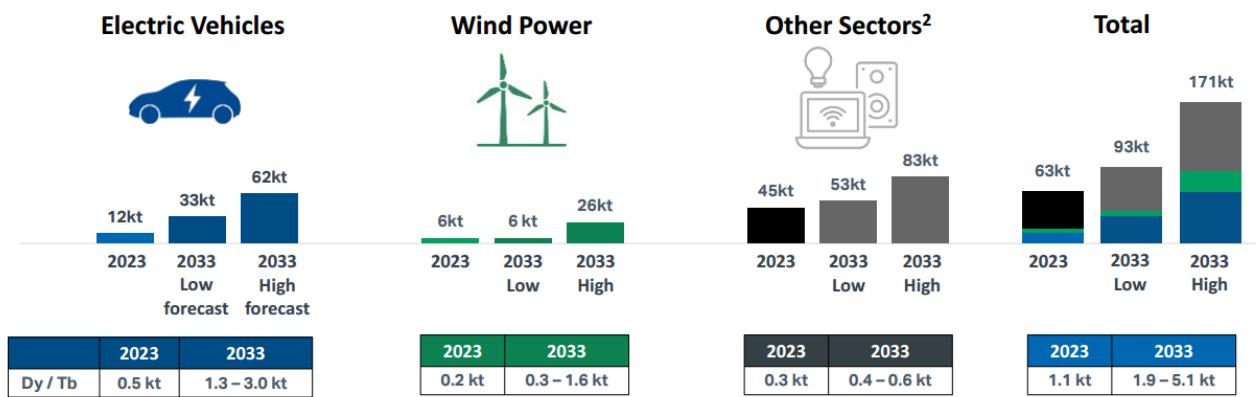


Figura 5 – Previsioni andamento domanda globale di Praseodimio-Neodimio [14]

Questi due settori, sebbene siano quelli che forniscono la maggiore spinta alla crescita del mercato delle terre rare, non sono gli unici. La digitalizzazione e l'elettronica di consumo, ad esempio si prevede che in Europa il consumo di Neodimio e Praseodimio nell'elettronica, che nel 2015 corrispondeva rispettivamente al 9% e al 5% del consumo totale europeo di quelle risorse, nel 2035 ammonterà al 12% e al 7%. [17]

Anche il settore della difesa, dove il progresso tecnologico e le prestazioni hanno la massima priorità, presenta una crescita della domanda di REE per poter supportare la produzione di droni, puntatori laser, sensori e componenti elettroniche.

Il legame tra le terre rare e lo sviluppo tecnologico rende il mercato delle REE un mercato in crescita; in particolare, caratterizzato da un tasso di crescita annuo (CAGR) di circa il 10% per i prossimi 8 anni. [21, 22]

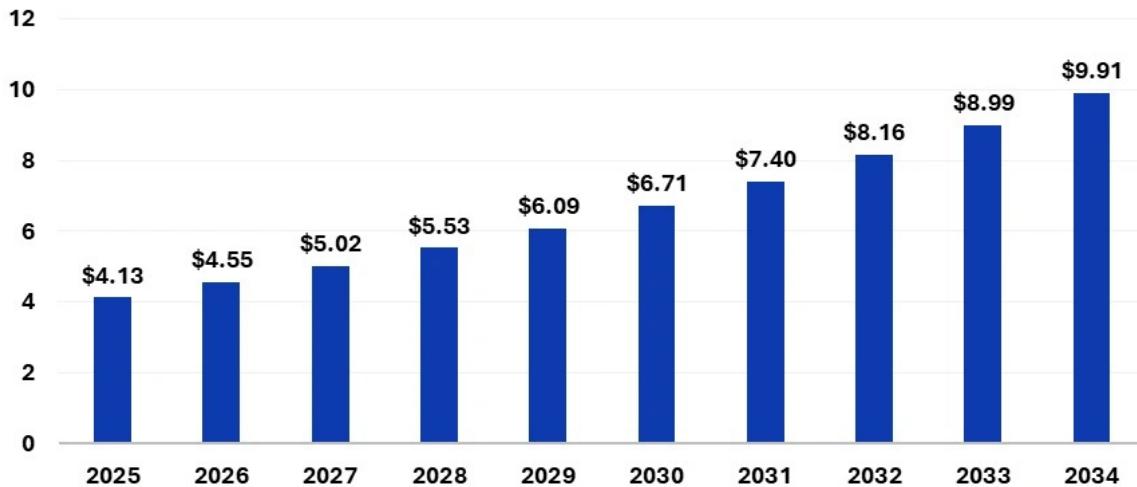


Figura 6 – Dimensioni attuali e previste del mercato globale delle terre rare (solo fasi a monte) in miliardi di dollari [21]

3.4 Elasticità della domanda rispetto al prezzo

L'attuale dipendenza di vari prodotti dalle terre rare e la mancanza di prodotti sostituti in grado di garantire le stesse proprietà e prestazioni rendono la domanda di REE, come quella di altri minerali affini, piuttosto inelastica.

Uno studio del fondo monetario internazionale (IMF) ha stimato che l'elasticità della domanda di terre rare rispetto al prezzo corrisponda a -0,17 nel breve periodo. Tale valore conferma l'inelasticità della domanda ed è simile a quella di elementi come il litio.

Lo stesso studio propone anche un valore pari a -0,4, questa stima mostra una domanda ben più reattiva rispetto al -0,17 citato in precedenza. Ciò è dovuto al fatto che questo valore più elastico è stato ottenuto su un'analisi più di lungo periodo, il che apre a possibilità di ottimizzazione dei processi produttivi che potrebbe limitare la richiesta di REE e allo sviluppo di possibili prodotti sostituti. [23]

3.5 Beni sostituti

Per limitare la propria dipendenza dalle terre rare e dai prodotti da esse derivati le industrie di svariati settori cercano soluzioni alternative, tale ricerca non è semplice dato che nessun altro elemento possiede le stesse proprietà chimiche di questi minerali. Inoltre, poiché tutte le REE sono elementi sono elementi critici per le supply chain, la sostituzione di un elemento delle REE con un altro, per quanto possibile, resta una soluzione inefficace.

Spesso i produttori si limitano a cercare di sviluppare prodotti con un minore contenuto di terre rare al loro interno, così da diminuirne il consumo. Esistono però casi in cui vengono effettivamente utilizzati prodotti sostituti in cui si sopperisce alle proprietà delle REE grazie all'uso della tecnologia, ad esempio:

- I magneti permanenti NdFe possono essere sostituiti da magneti alnico, composti da alluminio, nichel e cobalto, o da magneti in ferrite. Queste due tipologie di magneti

permanenti non richiedono terre rare per la loro produzione e possono essere usati nel settore della mobilità elettrica come in quello dell'energia eolica, ma non garantiscono lo stesso livello di prestazioni dei magneti contenenti REE. Inoltre, bisogna notare che contengono altri materiali spesso ritenuti critici, come il cobalto. [6]

- I motori elettrici asincroni, o a induzione, contrariamente ai motori elettrici sincroni non si basano sull'uso di magneti permanenti e rappresentano un'alternativa low cost e non dipendente dalle terre rare. Motori di questo tipo sono già stati utilizzati con successo in diversi veicoli elettrici e sembrano essere l'alternativa preferita dai produttori del settore. [6]
- Il generatore asincrono a doppia induzione (DFIG) permette al settore eolico la produzione di turbine più economiche, ma meno efficienti rispetto a quelle basate sui magneti permanenti con terre rare. In futuro, per l'energia eolica un'altra alternativa potrà essere rappresentata dai superconduttori, che sono però ancora in fase di sviluppo. [6]

4 ANALISI DELL'OFFERTA

4.1 Principali attori

4.1.1 Cina

Le aziende che sostengono e alimentano l'industria delle terre rare cinese, spesso sotto la proprietà di enti statali o regionali, sono poche. Ciò è dovuto a una serie di fusioni e acquisizioni avvenute nel corso degli anni per favorire la crescita di questa industria. Un esempio è la fusione, annunciata nel 2021, di China Southern Rare Earth Group, Minmetals Rare Earth e China Rare Earth Co. che ha creato il China Rare Earth Group. Proprio il China Rare Earth Group nel 2024 ha acquisito il Guangdong Rare Earth Industry Group Company Limited che, in precedenza, era un altro dei principali produttori cinesi.

Attualmente i leader del mercato cinese e, di conseguenza, di quello globale sono China Northern Rare Earth Group e China Rare Earth Group. Il primo, grazie allo sfruttamento del deposito di Bayan Obo, possiede la maggiore capacità di estrazione di terre rare leggere e produttiva per quanto riguarda alcuni prodotti derivati. Il secondo invece, oltre ad avere una solida capacità produttiva per quanto riguarda le terre rare leggere, è il principale produttore globale di terre rare pesanti e delle lavorazioni ad esse legate. [3, 24]

4.1.2 Australia

Compagnie australiane come Lynas, Iluka e Arafura sono la principale fonte di concorrenza per i colossi cinesi, le prime due in particolare nel 2024 ricoprivano rispettivamente la prima e la seconda posizione per capitalizzazione di mercato al di fuori dei gruppi cinesi. [15]

Con le sue operazioni nell'Australia occidentale e in Malesia, dove può vantare il più grande stabilimento al mondo per la raffinazione e separazione di REE, nel 2025 Lynas Rare Earths ha prodotto 10000 tonnellate di REE, di cui 6500 di Neodimio-Praseodimio. Inoltre, nel 2025 è diventata l'unico produttore al di fuori della Cina di terre rare pesanti. Questo, grazie anche a un collocamento istituzionale da 750 milioni di dollari australiani per finanziare i propri investimenti e ad altri investimenti provenienti dal Giappone, rafforzerà la posizione di leader tra le alternative al mercato cinese. [25]

Iluka Resources opera a sua volta nell'Australia occidentale, con 70 anni di storia nell'ambito minerario, la compagnia si è recentemente inserita nel mercato delle terre rare e si sta rapidamente espandendo.

Localizzata nella parte settentrionale dell'Australia, Arafura Resources ha ultimato il Nolans project, un progetto per l'apertura di un sito industriale capace di effettuare operazioni di estrazione e separazione e che sarà in grado di fornire il 5% delle terre rare richieste dai produttori globali di magneti. [26]

4.1.3 Stati Uniti

Negli Stati Uniti il mercato delle terre rare attualmente è molto dinamico, la guerra di dazi tra USA-Cina ha portato un'accelerazione nel processo di ricerca ad alternative al mercato cinese. Al momento però l'unica grande realtà è rappresentata da MP Materials, le altre

compagnie americane coprono percentuali molto piccole del mercato, ma visto il forte impegno governativo per sviluppare la propria industria hanno ampio margine di crescita.

La gestione della politica estera da parte del governo ha fortemente influenzato le attività di MP Materials, che ha dovuto interrompere le proprie esportazioni verso la Cina a causa dei dazi imposti sui suoi prodotti dal paese asiatico. L'impatto della geopolitica non è stato solo negativo, ha portato alla nascita un accordo con il Department of Defense (DoD) che permetterà a MP Materials di espandere la produttività del giacimento di Mountain Pass e di costruire un secondo stabilimento per la produzione di magneti. [27]

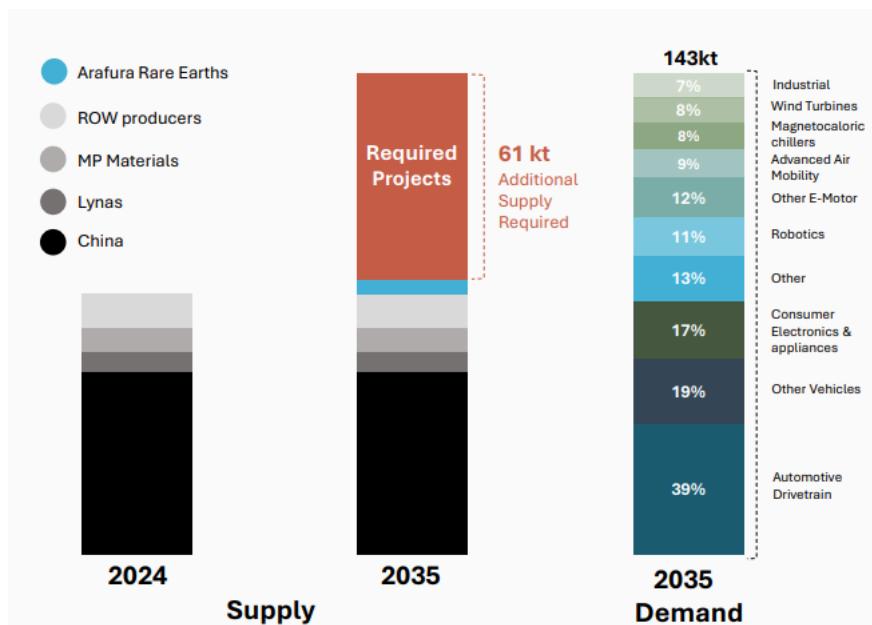


Figura 7 - Domanda e offerta globali di NdPr [26]

4.2 Struttura dei costi

L'integrazione verticale che caratterizza molti dei protagonisti del settore porta a dover finanziare varie attività, con i loro rispettivi costi. Tra queste quella principale, come riportato in *Tabella 3*, è la raffinazione e separazione. Questo stadio può costituire fino al 75% dei costi operativi della supply chain. Si stima che i costi operativi della sola fase di separazione siano superiori a 5500\$ per tonnellata di ossido di REE, di cui la maggior parte viene spesa per reagenti chimici. [28, 29]

L'attività di estrazione e fresatura del minerale grezzo varia in base a luogo di estrazione e tipo di giacimento, la somma di tutti i costi operativi è generalmente compresa tra i 15 e i 40 mila dollari per tonnellata. [30]

Operating Costs	Unit	Value
NdPr Oxide	USD\$/kg	38.38
Tb Oxide	USD\$/kg	632.56
Dy Oxide	USD\$/kg	168.68
SEG Concentrate	USD\$/kg	4.22
La	USD\$/kg	0.84

Figura 8 - Costi operativi totali delle fasi di estrazione, raffinazione e separazione per tipologia di prodotto [31]

Oltre ai costi operativi anche i costi per realizzare progetti greenfield sono molto elevati, un impianto greenfield per le operazioni di estrazione e raffinazione può richiedere più di un miliardo di dollari per la sua costruzione; di cui circa 50 milioni per esplorazione e ricerca di un giacimento e 300 milioni per le strutture addette alla fase di separazione. [29, 30]

Tabella 3 - Costi lungo la filiera del mercato delle terre rare [30]

Attività	Estrazione e fresatura	Separazione e raffinazione	Lavorazione dei metalli	Produzione di leghe o polveri	Produzione di magneti
Capitale richiesto	Medio/Alto	Alto	Medio/Alto	Medio/Alto	Medio/Alto

Infine, occorre considerare i crescenti costi di sostenibilità ambientale, che nei paesi con normative stringenti possono incidere significativamente. La gestione dei residui radioattivi comporta costi di smaltimento maggiori rispetto ad altri settori minerari. Anche gli investimenti in sistemi di trattamento delle acque reflue e per la riduzione delle emissioni atmosferiche vanno ad aumentare il costo complessivo.

4.3 Barriere all'ingresso

Gli ingenti costi da affrontare sono solo una delle barriere all'ingresso da superare per potersi inserire con successo nel mercato delle terre rare.

I costi eccessivi e le economie di scala dei vari livelli della supply chain, sfruttate al meglio dai produttori più grandi e affermati nel settore, rendono difficile un inserimento profittevole nel mercato. Per di più queste non sono le uniche barriere all'ingresso da dover superare.

Le strutture atomiche simili tra loro aumentano la difficoltà nella separazione delle terre rare ai livelli di purezza richiesti dal mercato e, poiché il know-how e le tecnologie per la separazione e la raffinazione delle terre rare sono diversi da quelli usati in altri processi minerari, risultano essere risorse difficili da reperire. Inoltre, il mercato degli strumenti per queste lavorazioni è controllato soprattutto dalla Cina, che nel 2023 ne ha limitato le esportazioni. [32]

Vanno poi considerati tutti i vincoli ambientali e legali dell'estrazione delle terre rare che, essendo un'attività mineraria, è sottoposta a vari vincoli ambientali che richiedono l'approvazione del progetto da parte degli appositi enti governativi del paese in cui si vuole iniziare l'attività. Oltre ai vincoli di sostenibilità dell'attività mineraria, nel caso delle terre rare bisogna anche far fronte alla gestione di scarti tossici e radioattivi. Adempiere agli standard richiesti comporta ulteriori costi soprattutto in occidente dove questi standard sono più stringenti.

I vincoli ambientali, oltre ad aumentare i costi complessivi per l'apertura di un impianto produttivo, aumentano anche il tempo complessivo necessario alla sua realizzazione. Possono essere richiesti più di dieci anni prima che un impianto greenfield inizi effettivamente ad essere produttivo. [30]

Un'ulteriore barriera da considerare è quella geografica, trovare un giacimento che sia sufficientemente ricco e parallelamente in una posizione geografica accessibile per gli scavi e a livello politico richiede di investire risorse e tempo in studi ed esplorazioni, senza alcuna garanzia di avere successo nella ricerca.

Infine, la forte concentrazione geografica crea una barriera di natura geopolitica: i paesi importatori dipendono da un numero limitato di fornitori e sono quindi vulnerabili a shock politici o commerciali, come dimostrato dalle restrizioni all'export introdotte in più occasioni da Pechino.

4.4 Innovazione tecnologica

Le terre rare, essendo elementi naturali, non sono affette da innovazioni tecnologiche, lo sono però i processi produttivi legati alla loro lavorazione ed ottenimento. In particolare, la ricerca di soluzioni innovative al momento è concentrata su due aspetti cruciali:

- soluzioni più efficienti per migliorare le fasi di produzione delle REE;
- il riciclo e il recupero delle terre rare all'interno di strumenti che hanno finito il loro ciclo vitale.

Sebbene ancora da studiare per verificarne la fattibilità di utilizzo e l'eventuale implementazione su grande scala industriale, le tecniche di separazione basate su membrane per separazione e su bioliscivazione hanno mostrato risultati promettenti per rendere più green ed economiche le fasi di separazione e di estrazione. [33, 34]

La ricerca di nuove tecnologie nell'ambito del recupero e del riciclo è attualmente quella più al centro dell'attenzione dei media e dei governi, la ricerca di riserve per emanciparsi da quelle cinesi passa dalle miniere urbane. I processi più utilizzati sono quelli pirometallurgici, caratterizzati però da un grande dispendio energetico e i processi idrometallurgici, che attualmente sono i più efficienti tra i processi molto diffusi.

Per riuscire a recuperare in maniera efficiente le terre rare stanno venendo sviluppate anche altre tecniche, tra queste le più recenti sono:

- La *selective extraction-evaporation-electrolysis* (SEEE) è un processo di tre fasi, sviluppato dall'università di Kyoto, che prevede l'estrazione dagli scarti di magneti, tramite l'immersione in una mistura, per isolare le REE presenti nel magnete. In seguito, con la fase di evaporazione i sottoprodoti della prima fase vengono eliminati, lasciando solo le terre rare da recuperare. Nella terza fase le REE vengono separate tramite processi elettrochimici. Tramite questo processo è possibile recuperare fino al 96% del neodimio presente in un magnete con una purezza superiore al 90% consumando meno energia rispetto ai processi attualmente più diffusi. [35, 36]
- Negli Stati Uniti sono in fase di sperimentazione i processi di *Continuous Chromatography* e *Flash Joule Heating*. Il primo è un processo usato nell'industria dello zucchero che una volta rielaborato sta risultando più efficiente ed economico dei processi di recupero tradizionali. Il secondo permette di catturare gli scarti tossici caratteristici delle lavorazioni delle terre rare, rendendo così il processo meno inquinante. [36]

4.5 Catena del valore

La catena del valore delle terre rare segue cinque fasi distinte, legate ai processi e alle lavorazioni che le REE subiscono lungo tutta la filiera.

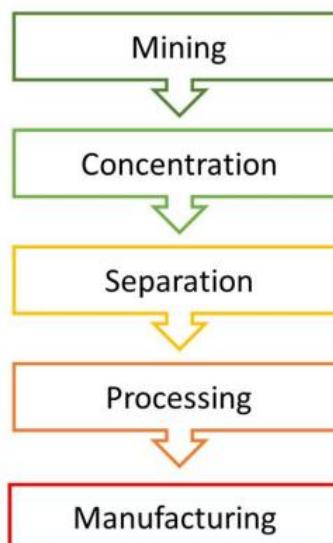


Figura 9 - Fasi della catena del valore [37]

Poiché con l'estrazione del minerale grezzo si ricava la materia prima, i produttori di terre rare non sono vincolati da forniture nelle prime due fasi. Con la fase di separazione, inizia a profilarsi la possibilità di doversi affidare a dei fornitori. I grandi protagonisti del settore sono spesso integrati verticalmente, occupandosi delle prime quattro fasi o direttamente di tutte e cinque. Chi ha internalizzato le fasi di separazione, raffinazione e lavorazioni successive è generalmente in grado di raffinare più di quanto riesca a estrarre dai propri giacimenti; per tale ragione può ricevere le materie prime da altre aziende del settore che, non essendo integrate verticalmente, si occupano esclusivamente delle prime due fasi. Sebbene la Cina sia leader anche nelle prime due fasi, nelle ultime tre la sua leadership si rafforza arrivando

ad essere avere il 92% della capacità di separazione e raffinazione globale e il 90% della capacità produttiva di magneti permanenti. [12, 38]

Con le recenti attenzioni rivolte verso lo sviluppo del riciclo come nuova fonte di terre rare, si può supporre che nei prossimi anni, con la domanda globale di REE in costante crescita, verrà a crearsi una sesta componente nella catena del valore: quella del recupero. Questo porterebbe al passaggio da una catena del valore lineare a una circolare come quella mostrata in *Figura 10*.

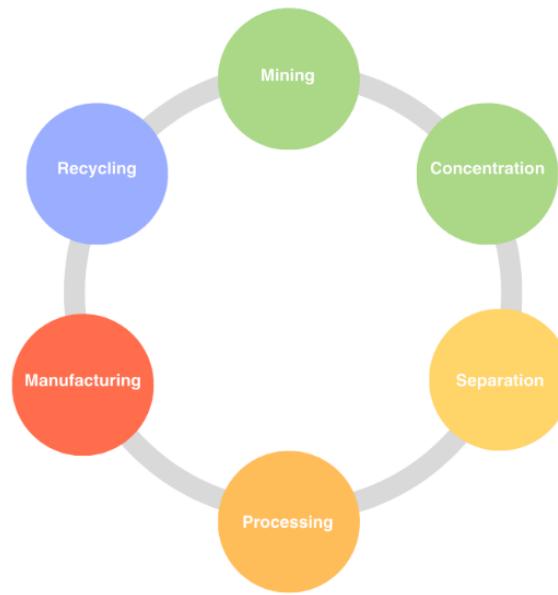


Figura 10 - Catena del valore futura

Lo sviluppo dei processi di recupero, unito alla crescita di nuovi player in tutte le fasi della supply chain apre alla possibilità di creare un mercato delle terre rare più differenziato, stabile e sostenibile.

5 ANALISI ECONOMICO-FINANZIARIA DEL MERCATO

5.1 Dimensioni del mercato e quote di mercato

Come detto precedentemente, se si considerano anche i processi downstream, il mercato delle terre rare nel 2024 ha raggiunto un valore globale di 12,44 miliardi di dollari e si prevede che nel 2033 arriverà ad un valore di 37 miliardi di dollari, con un tasso di crescita annuale medio del 12,83%. [39]

La produzione globale del 2024 è stata di 390 mila tonnellate di REO, di cui 270 mila prodotte in Cina, 45 mila negli USA e 13 mila in Australia. Si osserva quindi un aumento della produzione globale, che nel 2023 ammontava a 376 mila tonnellate di REO. In particolare, Cina e USA, che nel 2023 avevano prodotto rispettivamente 255 e 41,6 mila tonnellate di REO, hanno aumentato la loro produzione. L'Australia, al contrario, mostra una riduzione della propria produzione passando dalle 16 alle 13 mila tonnellate prodotte. Altri paesi in forte crescita sono la Tailandia e la Nigeria, passate rispettivamente da 3,6 a 13 mila tonnellate e da 7,2 a 13 mila tonnellate nell'arco di un anno. [2]

Come mostrato in *Figura 11*, la Cina è leader in tutti i livelli della supply chain essendo in predominio su produzione tramite estrazione e riciclaggio, separazione e raffinazione. Anche nella produzione dei prodotti legati alle REE l'industria cinese mantiene il primato, gestendo il 92% della produzione globale di magneti. [8]

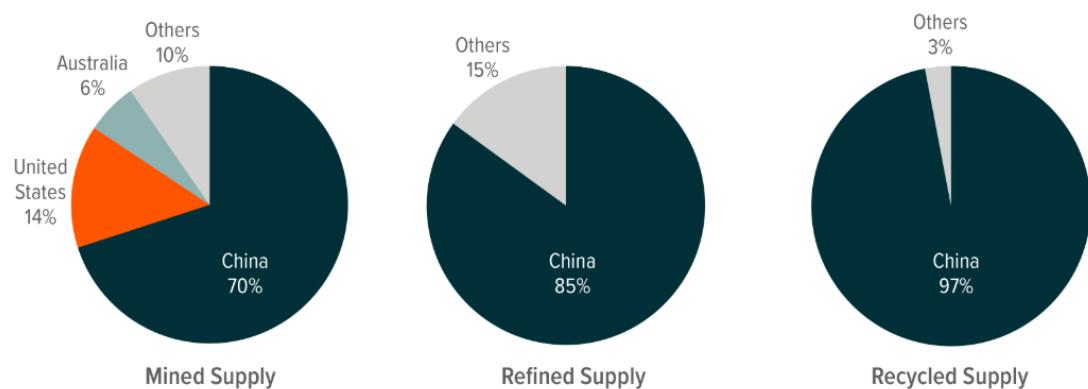


Figura 11 – Suddivisione capacità globale di estrazione, di raffinazione e di riciclo delle REE nel 2022-2023 [40]

Inoltre, se ci si concentra solo sulle terre rare pesanti, nel 2023 la quota di mercato cinese era del 99%. Tale quota è destinata a diminuire grazie alla scoperta di giacimenti di HREE anche in altri paesi, ma per il loro sviluppo saranno necessari anni. Questo permetterà ai grandi gruppi cinesi di mantenere, sfruttare e rafforzare questa posizione di monopolio in vista dell'arrivo di eventuali competitors. [41]

Gli Stati Uniti rappresentano saldamente la seconda potenza produttiva globale, il mercato interno è dinamico, con molte nuove aziende nate recentemente con grande potenziale di crescita e un rapido sviluppo della loro integrazione verticale nel settore. Un esempio è USA

Rare Earth, fondata nel 2019, che nel 2026 completerà il proprio impianto capace di produrre annualmente 5000 tonnellate di magneti. [42]

Sebbene in termini di produzione di terre rare leggere l’Australia non sia ai livelli degli Stati Uniti, la sua posizione come terzo principale protagonista del mercato è dovuta al suo recente sviluppo di capacità di estrazione di terre rare pesanti e alla sua capacità di separazione e raffinazione che, escludendo la Cina, è stata una fase produttiva ignorata da tutti gli altri paesi. Questo ha permesso alle compagnie australiane di sviluppare know-how e tecnologie prima degli altri, il che adesso le mette in una posizione di vantaggio rispetto ai competitor esteri ancora in fase di sviluppo.

5.2 Tipologia di concorrenza e strategie di prezzo

La crescente attenzione rivolta alle terre rare sta portando a un lento ma graduale cambiamento della sua struttura, con il passare degli anni il totale monopolio cinese si sta indebolendo. Sebbene la Cina mantenga tutt’ora quote estremamente elevate in alcuni livelli della supply chain, tali quote stanno diminuendo in favore di paesi come USA e Australia.

La produzione mineraria di terre rare leggere cinese è passata dal costituire circa il 95% della produzione globale a costituirne il 70% nel 2023. Anche nella raffinazione, settore di cui al momento la Cina detiene il 91%, è previsto che nel 2040 tale quota sarà ridotta al 73%. Questi cambiamenti dimostrano come nel lungo periodo si potrebbe creare un mercato più competitivo e diversificato. [28, 43]

Per difendere la propria posizione di leadership nel settore, i gruppi cinesi hanno adottato una strategia di concorrenza di prezzo. L’industria delle terre rare cinese è infatti matura e ben sviluppata, richiede investimenti meno ingenti per la propria e crescita e permette di sfruttare al meglio le economie di scala. Grazie a queste caratteristiche il prezzo proposto dalle compagnie cinesi è estremamente basso.

Lo dimostra l’andamento del prezzo del NdPr mostrato in *Figura 12*, che attualmente è pari a circa 65\$/kg, mentre i produttori non cinesi hanno bisogno di venderlo a prezzi più che doppi per essere incentivati a produrlo. Il range di prezzi che i produttori non cinesi richiedono per attivare la produzione è rappresentato dall’area compresa tra le linee tratteggiate blu in *Figura 12*.



Figura 12 – Andamento del prezzo del NdPr [28]

La risposta a questa strategia delle compagnie non cinesi è quella di fare leva sul desiderio delle industrie di vari settori di garantire maggiore stabilità alle proprie supply chain. Per proteggersi dall'instabilità delle forniture cinesi e dalla volatilità dei prezzi, i consumatori stipulano accordi con i produttori per ricevere forniture a prezzi fissi per determinati periodi di tempo o sono semplicemente disposte ad accettare di pagare i prezzi più elevati richiesti dai produttori non cinesi.

La dinamica che queste due strategie creano è quella di una concorrenza basata su uno scontro tra prezzo e “qualità”, dove la qualità più alta è rappresentata da prodotti di origine certificata che garantiscono flussi di forniture stabili e costanti.

5.3 Marginalità e redditività delle imprese

A causa della strategia di prezzo citata in precedenza le imprese cinesi operano con redditività molto basse. Ad esempio, il più grande produttore globale China Northern Rare Earth Group nel 2024 ha avuto un margine operativo del 5,6%. [28]

Nonostante questa dinamica di mercato disincentivi la nascita di altri competitors, anche le compagnie cinesi stanno subendo l'impatto della riduzione dei prezzi. Un caso emblematico è quello di China Minmetals Rare Earth, che ha visto ridursi il proprio EBITDA del 65% tra il 2023 e il 2024, passando da un margine operativo lordo del 18,3% ad uno del 7,5%. [45]

Molte imprese occidentali, in particolare quelle formate di recente, non riescono a sostenere prezzi l'attuale livello dei prezzi e fanno affidamento su fondi e incentivi governativi per riuscire a raggiungere il break even point. Anche realtà più sviluppate presentano utili netti bassi o in certi casi negativi, ad esempio:

- MP Materials, il principale produttore statunitense, ha chiuso il 2024 con una perdita di 74 milioni e una riduzione del 20% dei propri ricavi. [44]

- In Australia Lynas Rare Earths e Iluka Resources, sebbene abbiano chiuso con bilanci positivi rispettivamente pari a 84,5 milioni e di dollari e 231,3 milioni di dollari australiani, hanno visto i loro ricavi ridursi del 37% e del 9%. [9, 10]

L'andamento dei prezzi non è l'unica ragione per cui le imprese del settore mostrano utili netti bassi o negativi, la costante crescita della domanda richiede una costante crescita della capacità produttiva di queste compagnie. Tale crescita richiede grandi investimenti di capitale che verranno ripagati solo nel lungo periodo e che impattano significativamente i risultati finanziari attuali.

6 REGOLAMENTAZIONE E FATTORI ESTERNI

6.1 Normative e regolamentazione

A livello normativo, negli anni più recenti, i mercati nazionali delle terre rare sono stati sottoposti a diversi vincoli e controlli.

In Europa nel 2024 l'UE ha promulgato il Critical Raw Material Act (CRMA), un regolamento con l'obiettivo di garantire l'approvvigionamento di tutti quei materiali che gli stati membri hanno identificato come critici per la loro industria civile e della difesa, tra questi materiali figurano le terre rare.

Il CRMA contiene al suo interno una serie di target che l'Unione dovrà impegnarsi a raggiungere entro il 2030, in particolare:

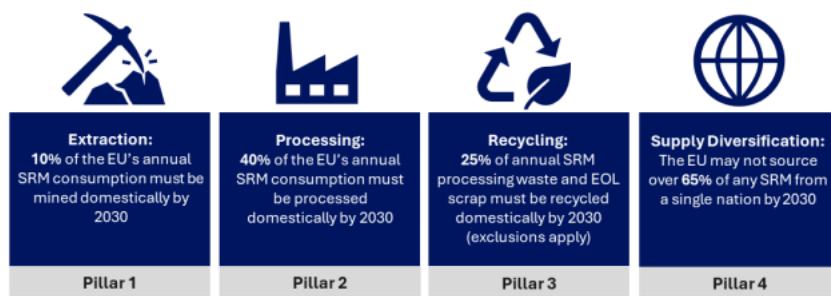


Figura 13 – Obiettivi del CRMA [16]

- il 10% del consumo europeo di materiali critici dovrà essere estratto nell'UE;
- il 40% dei materiali consumati dovranno essere processati internamente all'Unione;
- il 25% degli scarti delle lavorazioni e dei prodotti a fine ciclo vitale dovrà essere riciclato;
- le forniture di materiali critici da un solo paese non dovranno rappresentare più del 65% delle forniture totali ricevute dall'UE.

Per cercare di ottemperare alle disposizioni del CRMA sono stati avviati progetti per lo sfruttamento di depositi di REE in Svezia, Finlandia e Spagna. Altri progetti per sviluppare la capacità di processamento delle terre rare sono in corso in Francia, Estonia e Polonia.

Tuttavia, per l'UE sarà difficile rispettare il vincolo temporale che si è imposta, l'assenza di strutture attualmente attive comporta la necessità di costruzione di impianti produttivi greenfield che richiedono circa dieci anni per essere completati.

In Cina, nel 2025, il ministero del commercio cinese ha implementato una serie di controlli sulle esportazioni di terre rare e dei magneti ad alte prestazioni da esse derivati. I fornitori cinesi dovranno richiedere una specifica licenza prima di poter soddisfare un ordine estero.

Ogni licenza farà riferimento a un singolo ordine o contratto di fornitura, il che permetterà alla Cina di controllare rigidamente le proprie esportazioni e di tagliare le forniture verso industrie e settori esteri ben specifici. [20]

6.2 Politiche governative e incentivi

Come detto in precedenza, molte imprese al di fuori della Cina fanno affidamento su incentivi governativi per riuscire a sostenere i propri investimenti e la propria crescita.

Negli Stati Uniti molti di questi investimenti arrivano dal Department of Defense (DoD), che tramite il *Defense Production Act (DPA) Title III* ha l'obiettivo di garantire una supply chain sicura all'industria militare. Quest'obiettivo ha portato alla nascita un accordo con MP Materials che prevede un prestito di 150 milioni di dollari, il mantenimento di un prezzo fisso di 110 \$/kg per il NdPr nei prossimi 10 anni e rende il DoD l'azionista di maggioranza. Inoltre, le terre rare sono state reinserite tra i materiali presenti nella *Defense National Stockpile*. Si stima che solo nel 2025 il Department of Defense abbia stanziato 439 milioni di dollari per rafforzare l'industria nazionale delle REE. [27, 39, 43]

Oltre alle imprese domestiche il DoD finanzia anche fornitori esteri, come dimostrato da un finanziamento di oltre 150 milioni alla compagnia australiana Lynas Rare Earths per la costruzione di un impianto produttivo sul suolo statunitense. [43]

Gli aiuti economici esteri ricevuti da Lynas Rare Earths provengono anche da altri paesi, il Giappone sostiene da anni la sua espansione tramite prestiti governativi e accordi di fornitura della propria industria domestica.

Parallelamente il Giappone ha istituito il *JOGMEC (Japan Organization for Metals and Energy Security)*, un ente che gestisce in maniera centralizzata i finanziamenti e la scorta nazionale di terre rare. Tramite queste attente strategie il paese negli ultimi anni ha ridotto la propria dipendenza dalle forniture cinesi del 30% ed esteso la copertura della propria scorta da 60 a circa 180 giorni. [43]

In Australia, il governo è coinvolto in prestiti volti a far crescere la capacità produttiva nazionale. Ad esempio, Iluka ha ricevuto un prestito di più di un miliardo di dollari australiani per poter finanziare la propria espansione. [14]

Il Canada, un anno dopo il rilascio della *Canada's Critical Minerals Strategy* ha allocato 1,5 miliardi di dollari in fondi da distribuire nei prossimi sette anni per favorire lo sviluppo della capacità produttiva domestica di minerali critici, tra cui figurano le terre rare. [46]

Le iniziative nazionali sono accompagnate da accordi e cooperazioni internazionali, tra i quali spicca la *Minerals Security Partnership (MSP)*: un'associazione di 14 paesi tra cui USA, Giappone, Australia, India e molti paesi dell'UE che ha lo scopo di allineare investimenti e strategie dei paesi aderenti. Esistono anche accordi bilaterali come quello tra USA e Australia e quello tra Unione Europea e Giappone.

La competizione tra questi paesi e la Cina, oltre che sul mercato, è presente anche nella ricerca di accordi con nazioni che stanno sviluppando la propria produzione di terre rare come Tanzania e Kazakistan. [43]

6.3 Impatto ambientale e sostenibilità

La stretta dipendenza di tecnologie vitali per la transizione energica da lavorazioni estremamente inquinanti dev'essere analizzata con attenzione per assicurarsi che, nel tentativo di perseguire obiettivi di sostenibilità ambientale, non si finisca per inquinare complessivamente più di quanto si farebbe con l'uso di tecnologie e mezzi "tradizionali".

L'estrazione e la raffinazione delle terre rare sono processi accompagnati da un forte impatto ambientale, in particolare:

- La fase di estrazione può comportare deforestazione, richiede un grande consumo di acqua e porta al rilascio di polveri sottili;
- I processi di separazione e raffinazione, con le loro lavorazioni chimiche, portano alla creazione di scarti tossici e a volte radioattivi.

Inoltre, tutte queste fasi della produzione delle REE sono accomunate da un intensivo consumo di energia elettrica, aggiungendo un impatto ambientale indiretto a quelli diretti citati in precedenza.

L'estrazione illegale di terre rare risulta ancora più dannosa per l'ambiente, per tale ragione la Cina ha recentemente incrementato i controlli al fine di fermare il commercio illegale delle REE.

6.3.1 Il caso del Myanmar

Il problema dell'estrazione illegale non colpisce solo la Cina, ma anche altri paesi asiatici. In Myanmar, a causa della guerra civile in corso, i territori confinanti con Cina e Tailandia sono sotto il controllo di gruppi ribelli. Tali gruppi portano avanti operazioni di estrazione di terre rare senza rispettare standard di sostenibilità ambientale e di sicurezza per i lavoratori.

Il rilascio nel terreno e nei fiumi di sostanze chimiche usate per l'estrazione desta preoccupazione nella vicina Tailandia, dove studiosi hanno rilevato livelli allarmanti di piombo e arsenico nelle acque dei fiumi Kok e Sai. La contaminazione delle fonti idriche mette a rischio attività di pesca, agricoltura e allevamento e la salute delle popolazioni locali.

Anche i lavoratori di queste miniere illegali soffrono le conseguenze della mancanza di dispositivi di protezione, presentando un tasso di mortalità estremamente elevato.

Attualmente la Tailandia è in stretti contatti con Cina e Myanmar per cercare di fermare queste attività illecite e limitare le devastanti conseguenze ambientali da esse derivate. [47]

6.4 Evoluzione tecnologica

Oltre al miglioramento dei processi tecnici, l'innovazione tecnologica influisce significativamente anche sulle dinamiche di mercato e si evolve per rispondere alle nuove necessità dei protagonisti di tutti i livelli della supply chain.

Ad esempio, la necessità di una provenienza certificata e controllata sta promuovendo l'adozione di sistemi di tracciabilità basati su blockchain e database distribuiti. Tali sistemi in Europa saranno obbligatori per accedere ai finanziamenti del Critical Raw Materials Act. La Cina, parallelamente, ha implementato un sistema di reporting mensile obbligatorio per le proprie imprese. [48, 49]

Anche l'uso dell'intelligenza artificiale è in espansione, combinato con l'uso di sensori avanzati permette un uso più efficiente dei reagenti chimici, riducendo costi operativi e impatto ambientale.

L'IA viene anche impiegata nella fase di studio e ricerca dei giacimenti, semplificando la ricerca e la stima del potenziale dei depositi che vengono trovati. Il suo utilizzo nel settore dell'esplorazione apre una nuova frontiera per l'estrazione delle terre rare: quella dei *depositi non convenzionali*, ovvero dei depositi primariamente di altri minerali e con concentrazioni di REE minori ma comunque estraibili. Gli algoritmi predittivi dell'intelligenza artificiale permettono anche di studiare le condizioni del sottosuolo tramite un'analisi delle condizioni della superficie, evitando così i costi e l'impatto ambientale associati agli scavi e alle trivellazioni che caratterizzano le fasi di studio preliminari. [50, 51, 52]

La competizione tecnologica sta favorendo la collaborazione tra imprese minerarie, centri di ricerca e università accelerando così la diffusione di brevetti, know-how e la condivisione di nuove tecnologie. I risultati di queste cooperazioni sono una grande spinta innovativa per il settore e portano risultati promettenti, come lo sviluppo del processo SEEE citato nei capitoli precedenti.

7 CONCLUSIONI

Lo studio condotto ha messo in evidenza la complessità e la rilevanza strategica del mercato delle terre rare nell'economia contemporanea, frutto dell'intreccio di dimensioni tecnologiche, ambientali e geopolitiche.

La domanda resta in crescita, con previsioni che ne garantiscono l'espansione grazie alla spinta di settori come quello della mobilità elettrica, delle energie rinnovabili e dell'elettronica avanzata. In particolare, i magneti permanenti al neodimio-praseodimio si affermano come il prodotto finito a maggior valore strategico, con ottime prospettive di crescita negli anni futuri. La provenienza delle forniture resta un tema centrale, con consumatori che preferiscono spendere di più per prodotti di provenienza certificata, tracciabili e ottenuti tramite una filiera più sostenibile.

Il fronte dell'offerta è quello che meglio rivela la situazione di dinamico cambiamento che il mercato sta attraversando. Permane il problema della concentrazione della fase di raffinazione in Cina, sebbene anche altri paesi abbiano iniziato a sviluppare una capacità di raffinazione domestica. Le barriere all'ingresso, le dinamiche monopolistiche e la volatilità dei prezzi minacciano i nuovi entranti che sono costretti ad affidarsi all'aiuto di enti governativi. Nonostante queste criticità gli investimenti sono numerosi, molte nuove imprese si stanno inserendo nel mercato e la quota di mercato cinese si sta lentamente riducendo.

La volatilità dei prezzi rende instabili i risultati economici di molte imprese che non riescono a produrre in volumi sufficientemente elevati da sfruttare le economie di scala come fanno le imprese cinesi che, forti del sostegno governativo e di capacità produttive superiori, mostrano risultati più stabili e costanti.

Le normative e le politiche governative per regolare il settore si stanno moltiplicando, promuovendo la crescita di imprese a livello locale o il friend-shoring grazie al riciclaggio e a investimenti in ricerca e sviluppo. A queste strategie si aggiungono partnerships internazionali mirate a ridurre la dipendenza dalla Cina. In risposta, Pechino rafforza il controllo sulla propria industria e cerca di rallentare la crescita industriale dei competitor tramite un'aggressiva concorrenza sul prezzo. Queste dinamiche rendono il mercato delle terre rare un mercato "anomalo", che non segue solo logiche economiche ma anche politiche e di sicurezza nazionale.

A livello ambientale il tentativo di ridurre gli impatti delle fasi estrazione e raffinazione dei minerali è condiviso globalmente, con ricerche e sviluppi di diversi processi alternativi a quelli attualmente usati. Queste ricerche promuovono la cooperazione tra industria e università, favorendo scambi di informazioni utili tra diversi livelli della filiera e tra diversi paesi. Sempre per merito della ricerca il riciclaggio dei prodotti a fine ciclo di vita sta gradualmente passando dall'essere una prospettiva futura all'essere una realtà concreta, questo permetterà di ridurre ulteriormente l'impatto ambientale legato alle terre rare e apre le porte allo sviluppo di un'economia circolare.

L'evoluzione tecnologica offrirà prodotti alternativi o con una minore quantità di REE richiesta, riducendo la pressione delle supply chain su alcuni elementi critici e aumentando l'elasticità della domanda. Parallelamente il miglioramento dei processi di esplorazione, estrazione e lavorazione permetterà di ridurre i costi di produzione e garantirà una maggiore trasparenza sulla provenienza dei minerali.

In conclusione, le terre rare incarnano una delle contraddizioni della transizione verde e digitale: materiali indispensabili per un futuro sostenibile, ma la cui produzione comporta importanti sfide ambientali ed economiche. La capacità di affrontare queste contraddizioni dipenderà dalla cooperazione tra governi, imprese e istituzioni di ricerca, dalla volontà di investire in innovazioni sostenibili e dalla creazione di regole internazionali condivise. Solo in questo modo sarà possibile garantire che la crescente domanda di terre rare venga soddisfatta in maniera sostenibile e trasparente, passando dall'essere fonte di attriti e tensioni all'essere un'opportunità per uno sviluppo equilibrato e resiliente a livello globale.

8 RINGRAZIAMENTI

Vorrei ringraziare tutti coloro che mi hanno accompagnato durante questo percorso universitario. Inizio ringraziando la professoressa Laura Abrardi, la relatrice che ha seguito la scrittura di questo elaborato e che mi ha dato la possibilità di approfondire questo interessante argomento.

Ringrazio la mia famiglia che mi ha supportato in tutti questi anni di studi, dividendo con me il peso dei momenti più difficili e ricordandomi le mie responsabilità quando le sottostimavo.

Ringrazio la famiglia Menozzi che, sebbene siano trascorsi anni, continua a essere accogliente come lo è stata fin dal mio primo giorno a Torino.

Ringrazio i miei amici di Catania, il cui affetto è sempre stato tangibile nonostante i chilometri di distanza.

Infine, ringrazio tutti gli amici conosciuti durante l'ormai non più nuovo capitolo torinese della mia vita: la loro presenza ha reso questo percorso divertente e indimenticabile.

9 BIBLIOGRAFIA

1. Gosen, Bradley S. Van, et al. *The Rare-Earth Elements: Vital to Modern Technologies and Lifestyles*. s.l. : U.S. Geological Survey, 2014.
2. *Mineral Commodity Summaries*. s.l. : U.S. Geological Survey, 2025.
3. Utikal, Prof. Dr. Jens Leker and Prof. Dr. Hannes. Joint Product Analysis of Rare Earths: Economic, Market and Technological Insights. *Journal of business chemistry*. 2022.
4. Tengye Magnets. *tymagnets*. [Online] <https://tymagnets.com/it/prezzo-npr/>.
5. Fortune Business Insights. [Online] 2025. <https://www.fortunebusinessinsights.com/rare-earth-elements-market-102943>.
6. Lisa Depraiter, Stéphane Goutte. The role and challenges of Rare Earths in the Energy Transition. 2023.
7. MP Materials. [Online] <https://mpmaterials.com/history/#timeline>.
8. USA Rare Earth. Investor Presentation. April 2025.
9. Iluka. 2024 Full Year Results . 19 February 2025.
10. Lynas Rare Earths. FY24 Results Presentation. 28 August 2024.
11. Tongtong Xu, Xudong Zheng, Biao Ji, Zihuai Xu, Sifan Bao, Xi Zhang, Guomeng Li, Jinfeng Mei and Zhongyu Li. Green recovery of rare earth elements under sustainability and low carbon: A review of current challenges and opportunities. 2023.
12. Lisa Depraiter, Stéphane Goutte and , Thomas Porcher. *Geopolitical risk and the global supply of rare earth permanent magnets: Insights from China's export trends*. 2025.
13. European Commission. Report on Critical Raw Materials in the Circular Economy. 2018.
14. Iluka. Diversifying the rare earths supply chain. 2024.
15. Statista. Rare earths industry worldwide. 2025.
16. Adamas Intelligence. Critical Raw Materials Act: Opportunities, Challenges, Viability, Next steps. 2024.
17. European Commission. Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU: A Foresight Study. 2020.
18. Seaman, John. Rare earths and China: A Review on Changing Criticality in the New Economy. 2019.

19. Onstad, Eric e Hyunjoo , Jin. Rare earth magnet users jolted into paying premium prices for ex-China supply. s.l. : Reuters, 2025.
20. Adamas Intelligence. China REE export restrictions: overview and guidelines for export license application. 2025.
21. Precedence Research. Rare Earth Metals Market Powers Up with Growing EV Demand and Tech Innovation. 2025.
22. TechSci Research. [Online] <https://www.techsciresearch.com/report/rare-earth-elements-market/30043.html>.
23. IMF. Geoeconomic Fragmentation and Commodity Markets. 2023.
24. Team, WireScreen Research. The Top Companies Behind the Rare Earth Industry. *WireScreen*. [Online] 2024. <https://wirescreen.ai/blog/rare-earth>.
25. Lynas Rare Earths Limited. FY25 Results, Towards 2030 Strategy. 2025.
26. Arafura Resources Limited. Nolans Project Roadshow. 2022.
27. MP Materials. A Transformational Public-Private Partnership. 2025.
28. Hay, Karen Kwok and George. China's tightest rare-earths headlock is financial. *Reuters*. [Online] 2025. <https://www.reuters.com/commentary/breakingviews/chinas-tightest-rare-earths-headlock-is-financial-2025-07-17/>.
29. Topf, Andrew. Processing plant to cost \$302 million- 1/3 of Avalon's rare earth project capex. *mining.com*. [Online] 2012. <https://www.mining.com/avalons-rare-earth-separation-plant-in-louisiana-to-cost-302-million/>.
30. U.S. Department of energy. Critical materials strategy. 2011.
31. American Rare Earths. Halleck Creek Scoping Study Technical Report. 2024.
32. Campbell, Charlie. Trump Wants Rare Earths. But Challenging China's Dominance Will Take More Than Tariffs. s.l. : TIME, 2025.
33. Emmanuel Yaw Owusu-Fordjour, Xinbo Yang. Bioleaching of rare earth elements challenges and opportunities: A critical review. 2023.
34. Joanna Kujawa, Sławomir Boncel. On membrane-based approaches for rare earths separation and extraction – Recent developments. 2023.
35. Tripathi, Aman. Japan's method to recycle used magnets for EVs recovers over 90% of rare-earth elements. *Interesting Engineering* . [Online] 2025. <https://interestingengineering.com/innovation/japan-method-recovers-rare-earth-evs>.
36. Sustainable Manufacturing Expo. Latest Advancements in Recycling Technologies for Rare Earth Elements. *Sustainable Manufacturing Expo*. [Online] 2025.

<https://www.sustainablemanufacturingexpo.com/en/articles/advancements-recycling-rare-earth.html>.

37. Navarro, Alondra. . *Supply Chains and Economic Trends for Rare Earths, Cobalt, and Niobium*. 2020.
38. Zadeh, John. *US Rare Earth Supply Chain: Rebuilding America's Critical Minerals Strategy*. 2025.
39. *imarc*. [Online] 2025. <https://www.imarcgroup.com/rare-earth-industry>.
40. Ruid, Madeline. Rare Earth Elements, Explained. *Global X*. [Online] 2023. <https://globalxetfs.eu/rare-earth-elements-explained/>.
41. Christopher Sanchez & Co. GeoCoded Special Report: The Geopolitics of Rare Earths . [Online] 2025. <https://www.sanchez.vc/geocoded-special-reports/geopolitics-of-rare-earths-2025>.
42. *USA Rare Earth*. [Online] <https://www.usare.com/about>.
43. Rare Earth Metals and Global Supply Chains: China's Dominance, Export Controls, and Western Responses. *Gosships Media*. [Online] 2025. <https://www.gosships.com/post/rare-earth-metals-and-global-supply-chains-china-s-dominance-export-controls-and-western-response>.
44. MP Materials. MP Materials Reports Fourth Quarter and Full Year 2024 Results. 2025.
45. China Minmetals Rare Earth Financials. *Craft*. [Online] 2025. <https://craft.co/china-minmetals-rare-earth/financials>.
46. Canadian Critical Minerals Strategy Annual Report 2024. *Government of Canada*. [Online] <https://www.canada.ca/en/campaign/critical-minerals-in-canada/canadas-critical-minerals-strategy/canadian-critical-minerals-strategy-annual-report-2024.html#S1>.
47. Satellite images show surge in rare earth mining in rebel-held Myanmar. *Aljazeera*. [Online] 2025. <https://www.aljazeera.com/news/2025/8/7/satellite-images-show-surge-in-rare-earth-mining-in-rebel-held-myanmar>.
48. European Union. Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024. *European Union*. [Online] <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj/eng>.
49. Mingyang, Tao. China issues regulation to cap total rare-earth quota, build traceability system. *Global Times*. [Online] 2025. <https://www.globaltimes.cn/page/202508/1341520.shtml>.

50. U.S. Department of Energy. AI Tool Speeds Up Critical Mineral Hunt, Boosting U.S. Supply. *U.S. Department of Energy*. [Online] 2025.
<https://www.energy.gov/technologycommercialization/articles/ai-tool-speeds-critical-mineral-hunt-boosting-us-supply>.
51. Exploring the Unexpected: An AI Model Uncovers Rare Earth Elements. *Journal of Petroleum Technology*. [Online] 2024. <https://jpt.spe.org/exploring-the-unexpected-an-ai-model-uncovers-rare-earth-elements>.
52. Digitizing the rare earths production process: from mine to magnet. *Aclara Resources*. [Online] <https://www.aclara-re.com/artificial-intelligence>.