



Università degli Studi di Napoli *Federico II*

Dipartimento di Scienze Politiche

Corso di Dottorato in
Politiche Pubbliche di Coesione e Convergenza nello Scenario Europeo,
XXXVI Ciclo

***L'autonomia europea alla luce dell'approvvigionamento
delle materie prime strategiche***

Tesi in
Geografia economico-politica – M-GGR/02

Candidato:
Dott. Andrea Cerasuolo
Matricola: DR995211

Relatrice:
Ch.ma Prof.ssa Daniela La Foresta

Indice

Abstract	2
1 Introduzione e obiettivi della ricerca.....	4
1.1 Introduzione	4
1.2 Obiettivi della ricerca.....	10
2 Metodo e letteratura sul metodo.....	13
2.1 Metodo	13
2.2 Letteratura sul metodo.....	17
3 Letteratura e stato dell'arte	23
3.1 Le catene di approvvigionamento europee delle materie prime critiche	24
3.2 Le città e le materie prime critiche: le narrazioni sulla transizione urbana ..	30
3.3 Le terre rare e la loro importanza geopolitico-economica.....	39
4 Risultati e discussione	57
5 Conclusioni	68
Bibliografia.....	72

Abstract

La risposta dell'Unione europea alla pandemia e al conflitto in Ucraina è stata quella di cogliere queste crisi per sviluppare una società a zero emissioni di carbonio e digitale. Questa doppia transizione si basa su materiali strategicamente importanti per l'economia dell'Unione europea, in particolare per la produzione di dispositivi elettrici ed elettronici ad alta tecnologia. Si tratta dei *critical raw materials* che stanno ottenendo sempre più attenzione sia a livello politico che scientifico. L'Unione europea ha redatto periodicamente diverse liste di materie prime critiche: nel 2011 queste ammontavano a quattordici mentre nel 2023 se ne contano trentaquattro. Attraverso la sua ultima iniziativa legislativa ancora in corso, la Commissione europea ha introdotto una nuova categoria: gli *strategic raw materials*. Questi ultimi, ricompresi all'interno dei *critical raw materials*, sono stati individuati tenendo conto del loro utilizzo nelle tecnologie strategiche alla base della transizione verde e digitale nonché nei settori della difesa e dello spazio. Inoltre, gli *strategic raw materials* sono potenzialmente soggetti a divari tra l'offerta e la domanda previste ritenendo che la loro produzione non possa subire rapide espansioni.

La strategia europea per far fronte alle proprie necessità prevede tre pilastri: due interni – il riciclo e lo sfruttamento minerario sostenibile all'interno dell'Unione – e uno esterno – la diversificazione delle fonti di approvvigionamento. Di fatto, i principali fornitori di questo tipo di materie prime non sono soltanto partner commerciali ma anche concorrenti economici e rivali strategici: Cina, Russia e Stati Uniti. Pertanto, le istituzioni europee hanno elaborato piani e programmi per acquisire *strategic raw materials* da paesi terzi cercando di non restringere ulteriormente i margini della propria autonomia strategica.

L'obiettivo principale della tesi è quello di “quantificare” l'approvvigionamento di materie prime strategiche a rischio. Ovvero, individuare la quota di import di ogni *strategic raw materials* che potrebbe subire verosimilmente interruzioni. Quindi, la domanda di ricerca che muove l'intera tesi si può riassumere come segue: a quanto ammontano le quote di approvvigionamento a rischio delle materie prime strategiche per l'Unione europea? In subordine vi è anche un altro obiettivo a cui mira questa ricerca: avviare una riflessione sulla cosiddetta “autonomia strategica aperta” – *open strategic autonomy* – che da qualche anno è il paradigma europeo nelle proprie relazioni internazionali con i paesi – e i gruppi di paesi – terzi. Si

ragionerà, quindi, su quanto i risultati dell'analisi effettuata per rispondere alla prima, e principale, domanda di ricerca influenzino le possibilità europee di dar seguito alla propria autonomia strategica.

1 Introduzione e obiettivi della ricerca

1.1 Introduzione

Le materie prime sono fondamentali per l'economia mondiale ed europea. Costituiscono un'indispensabile base industriale, essendo utilizzate in una vasta gamma di beni adoperati nella vita quotidiana e nelle moderne tecnologie. L'accesso affidabile e senza ostacoli a determinate materie prime è una preoccupazione crescente all'interno dell'Unione europea e in tutto il mondo. Per affrontare questa sfida, la Commissione europea ha creato un elenco di materie prime critiche – *critical raw materials*, CRM – per l'UE, che è soggetto a un riesame e ad un aggiornamento periodico. Queste risorse comprendono materie prime di grande importanza per l'economia dell'UE e con un alto rischio associato alla loro fornitura.

I CRM sono collegati a quasi tutte le industrie in pressoché tutte le fasi della catena di approvvigionamento. Del resto, il progresso tecnologico e la qualità della vita dipendono sempre più dall'accesso a un numero crescente di materie prime. Ad esempio, uno *smartphone* può contenere fino a cinquanta diversi tipi di metalli, ognuno dei quali contribuisce alle sue dimensioni molto contenute, alla sua leggerezza e funzionalità. Inoltre, i CRM sono strettamente legati alle cosiddette “tecnologie pulite”. Sono insostituibili in pannelli solari, turbine eoliche, veicoli elettrici e illuminazione a basso consumo energetico (Commissione europea, 2018a).

Il quadro viene complicato dal fatto che le industrie e le economie europee dipendono dai mercati internazionali per procurarsi le risorse di cui hanno bisogno poiché queste sono prodotte o fornite da paesi terzi. Sebbene nell'UE esistano produzioni interne di alcuni CRM, in particolare di afnio, nella maggior parte dei casi l'UE dipende dalle importazioni da paesi terzi. La fornitura di molte materie prime critiche è altamente concentrata. Ad esempio, la Cina fornisce il 100% degli elementi di terre rare pesanti¹ di cui ha bisogno l'UE, la Turchia il 99% della domanda di boro e il Sud Africa il 71% del fabbisogno di platino e una quota ancora più elevata di iridio, rodio e rutenio. I rischi associati alla concentrazione della

¹ Disprosio, erbio, itterbio, ittrio, lutezio, olmio, terbio e tulio.

produzione sono in molti casi aggravati da bassi tassi di sostituzione e di riciclaggio (Commissione europea, 2018a).

Nel 2011 è stato pubblicato un elenco di quattordici CRM nella comunicazione sulle materie prime (Commissione europea, 2011). Sono stati valutati in totale quarantuno materiali: l'elenco delle materie prime critiche è stato stilato come azione prioritaria dell'iniziativa UE sulle materie prime del 2008 (Commissione europea, 2008). La Commissione si è impegnata ad aggiornare l'elenco almeno ogni tre anni per tener conto degli sviluppi della produzione, del mercato e della tecnologia. Nel 2014 è stato pubblicato un primo elenco aggiornato di venti CRM – valutando questa volta cinquantaquattro materiali – nella comunicazione triennale sull'elenco delle materie prime critiche (Commissione europea, 2014).

Nel 2017, un terzo elenco di ventisette CRM – a fronte di settantotto materiali analizzati – è stato pubblicato nella comunicazione sull'elenco delle materie prime critiche di quel triennio (Commissione europea, 2017a) sulla base di una metodologia rivista e corretta. Di fatti, nel luglio di quell'anno sono state pubblicate le linee guida che, basandosi sulla metodologia utilizzata per gli elenchi di CRM nel 2011 e 2014, integravano i miglioramenti metodologici individuati dalla Commissione nell'ambito di un progetto relativo alla valutazione della metodologia per la redazione dell'elenco delle materie prime critiche in settori quali i loro processi di estrazione e raffinazione, nonché nel commercio, nella sostituzione e nel riciclaggio (Commissione europea, 2017b). I principali parametri utilizzati per determinare la criticità del materiale per l'UE sono due. Il primo è l'importanza economica: la metodologia per determinare la criticità di elementi e composti tiene conto delle informazioni sull'importanza di un materiale per l'economia dell'UE in termini di applicazioni finali e – utilizzando la classificazione NACE – di valore aggiunto nei corrispondenti settori manifatturieri dell'UE. L'importanza economica è corretta da un indice di sostituzione relativo alle prestazioni tecniche e di costo dei sostituti dei CRM per le singole applicazioni. Come secondo parametro si considera il rischio di approvvigionamento. Il rischio di approvvigionamento riflette il rischio di un'interruzione della fornitura dei CRM verso l'UE. Si basa sulla concentrazione dell'approvvigionamento da fonti primarie localizzate nei paesi produttori di materie prime, tenendo conto della stabilità dei rispettivi regimi politici e degli aspetti commerciali. Vengono presi in considerazione due gruppi di paesi: i produttori globali e i paesi da cui l'UE acquista materie prime. Il rischio di approvvigionamento viene misurato allo stadio “a collo di bottiglia” dei

materiali in esame – sia esso in fase di estrazione o di raffinazione – che rappresenta il livello più alto di rischio nell’approvvigionamento per l’Unione. In questo contesto, la sostituzione e il riciclaggio vengono considerate misure di riduzione del rischio (Commissione europea, 2017b).

Nel 2020 sono stati analizzati sessantasei materiali: tuttavia, due di questi erano in realtà gruppi di materiali – terre rare e metalli del gruppo del platino – che contenevano a loro volta altri elementi portando il totale dei “materiali singoli” analizzati a ottantatré. Quindi, è stato pubblicato un quarto elenco di trenta CRM (Commissione europea, 2020b): questa nuova lista è stata accompagnata anch’essa da un documento aggiornato sulla metodologia che stavolta, però, non si discostava molto da quella precedente (Commissione europea, 2020c). Inoltre, in quell’anno la comunicazione sulle materie prime critiche annunciava anche il lancio di un’alleanza industriale dedicata a garantire un approvvigionamento sostenibile di materie prime per l’Europa (EIT RawMaterials, 2020). L’alleanza riunisce tutte le parti interessate lungo le catene del valore strategiche e gli ecosistemi industriali concentrandosi sulle esigenze più urgenti: aumentare la resilienza dell’UE negli elementi delle terre rare e nelle catene del valore dei magneti permanenti. Ciò è essenziale per gli ecosistemi industriali chiave dell’UE, quali l’industria automobilistica, le energie rinnovabili, la difesa e l’aerospazio. In seguito, l’alleanza ha allargato i propri compiti per far fronte alle altre impellenti esigenze di materie prime e metalli di base, comprendendo i progetti a sostegno dell’economia circolare e del *Green Deal* dell’UE (DG COMM, 2020a). Nel settembre di quell’anno, sempre su impulso della Commissione europea, veniva pubblicato un altro studio che ha stimato il fabbisogno di materiali per alcune tecnologie emergenti, come le tecnologie per la produzione di energia “pulita” – fotovoltaica, eolica e il loro stoccaggio – la mobilità elettrica e le tecnologie digitali – tecnologie dell’informazione e della comunicazione, robotica, stampa 3D –, sulla base dei piani per la neutralità climatica dell’UE entro il 2050 e di altri programmi (CLIMA, 2020). Tale report ha fornito una prospettiva per il 2030 e il 2050 della domanda di materiali per i citati settori e ha identificato i rischi di approvvigionamento e le strozzature a diversi livelli delle catene di approvvigionamento (Bobbà, Carrara, Huisman, Mathieux, & Pavel, 2020).

Nel frattempo, nel gennaio 2018, la Commissione aveva pubblicato una relazione che evidenziava il potenziale di un uso più circolare delle materie prime critiche nelle economie e nelle società europee. Il documento, esaminando i settori importanti per le materie prime

critiche e descrivendo le politiche dell'UE in materia, riassume le iniziative chiave intraprese, presenta e fornisce dati, identifica le buone pratiche e indica possibili ulteriori azioni per migliorare la circolarità dei CRM (Commissione europea, 2018b). Inoltre, nel maggio 2019 la Commissione aveva anche pubblicato una relazione che mostrava le pratiche esistenti per recuperare materie prime critiche e altre risorse dai rifiuti dei siti estrattivi e dalle discariche. La relazione delinea i processi tecnologici per il recupero di diversi materiali dagli scarichi minerari e dai rifiuti industriali, nonché le migliori pratiche per migliorare la base di conoscenze sulla disponibilità di materiali secondari – ovvero, ottenuti tramite il riciclo delle materie prime già utilizzate – fornendo anche potenziali stime di recupero di determinati materiali e delineando i prerequisiti per le pratiche di recupero su una scala più ampia rispetto a quanto conosciuto fin ad allora (Blengini, Mathieux, Mancini, Nyberg, & Viegas, 2019).

Questi documenti e gli elenchi di CRM hanno diversi scopi. Innanzitutto, dovrebbero aiutare a rafforzare la competitività dell'industria europea in linea – almeno dal 2020 – con la sua nuova strategia industriale (Commissione europea, 2020d). Inoltre, dovrebbero stimolare la produzione di materie prime critiche potenziando nuove attività minerarie nell'UE. In aggiunta, dovrebbero promuovere l'uso e il riciclaggio efficienti delle materie prime critiche, un settore divenuto prioritario nel piano d'azione dell'UE per l'economia circolare (DG COMM, 2020b). Oltre a ciò, si mira ad aumentare la consapevolezza dei potenziali rischi per l'approvvigionamento di materie prime critiche e, di contro, delle eventuali opportunità per i paesi, le imprese e gli investitori dell'UE. Infine, le comunicazioni e gli elenchi relativi ai CRM vorrebbero spingere le istituzioni europee e i paesi membri a negoziare accordi commerciali, sfidare le misure di distorsione commerciale, sviluppare azioni di ricerca e attuare l'Agenda 2030 e i suoi obiettivi di sviluppo sostenibile.

Nel 2023 è stato pubblicato un quinto elenco di trentaquattro materie prime critiche nel secondo allegato della proposta di regolamento che dovrebbe dar vita al cosiddetto *European Critical Materials Act* (Commissione europea, 2023a). L'elenco si basa su un nuovo e aggiornato studio sui CRM (Commissione europea, 2023b). Inoltre, sempre nel 2023, su impulso delle istituzioni europee è stato pubblicato uno studio che, con un orizzonte temporale che si estende fino al 2030 e al 2050, fornisce un quadro più completo delle tecnologie che serviranno per raggiungere gli obiettivi strategici dell'UE e, di conseguenza, stima la domanda di CRM negli anni a venire (Carrara et al., 2023).

Oltre a ciò, nel 2023 la proposta legislativa e gli studi menzionati hanno introdotto anche il concetto e un elenco di materie prime strategiche – *strategic raw materials*, SRM. La distinzione fra materie prime critiche e strategiche si può riassumere come segue. Laddove una materia prima critica è caratterizzata da un elevato rischio di interruzione della sua fornitura e dalla sua importanza per l'intera economia dell'UE, una materia prima strategica è inoltre caratterizzata dalla sua importanza per alcuni settori strategici come le energie rinnovabili, le tecnologie digitali, aerospaziali e militari, dal confronto fra la crescita prevista della sua domanda e l'offerta attuale e dalle difficoltà nell'incremento della sua produzione. Le materie prime strategiche hanno proprietà che le rendono molto difficili da sostituire nei prodotti dove vengono utilizzate senza una significativa perdita di prestazioni. Esempi di materiali strategici includono gli elementi delle terre rare presenti nei magneti permanenti utilizzati per produrre i motori delle turbine eoliche, il litio utilizzato per le batterie, il rame per l'elettificazione e il silicio utilizzato per semiconduttori e moduli solari fotovoltaici (Carrara et al., 2023). Di seguito viene fornita una tabella riassuntiva con tutte le materie prime critiche e strategiche secondo l'elenco più aggiornato.

Tabella n. 1 – Materie prime critiche, e strategiche in corsivo, per l'Unione europea

Afnio	<i>Cobalto</i>	<i>Grafite</i>	Scandio
Antimonio	Elio	<i>Litio</i>	<i>Silicio</i>
Arsenico	Feldspato	<i>Magnesio</i>	Stronzio
Barite	Fluorite	<i>Manganese</i>	Tantalo
Bauxite	Fosforite	<i>Nichel</i>	<i>Elementi delle terre rare per magneti²</i>
Berillio	Fosforo	Niobio	<i>Titanio</i>
<i>Bismuto</i>	<i>Gallio</i>	<i>Metalli del gruppo del platino³</i>	<i>Tungsteno</i>
<i>Boro</i>	<i>Germanio</i>	<i>Rame</i>	Vanadio
Carbon coke			

Fonte: *Commissione europea*.

Appare opportuno, prima di esporre gli obiettivi della presente tesi, soffermarsi a illustrare i contenuti della proposta di regolamento sulle materie prime critiche – *European*

² Cerio, disprosio, gadolinio, neodimio, praseodimio, samario e terbio.

³ Iridio, osmio, palladio, platino, rodio e rutenio.

Critical Materials Act – a cui si è accennato poco più su. La proposta, ormai passata – con modifiche – al voto della plenaria del Parlamento europeo e interessata dal “trilogo” tra le diverse istituzioni europee, mira a rafforzare le diverse fasi della catena del valore delle materie prime strategiche. Lo scopo sarebbe di garantire che entro il 2030 la capacità estrattiva dell’UE copra almeno il 10% del proprio consumo annuo di materie prime strategiche, la capacità di trasformazione dell’UE assicuri almeno il 40% del suo consumo annuo di *strategic raw materials* e la capacità di riciclaggio dell’UE corrisponda perlomeno al 15% del consumo annuo europeo di SRM. La proposta contribuirebbe a diversificare le importazioni di materie prime strategiche dell’UE al fine di garantire che, entro il 2030, nessun paese terzo fornisca più del 65% del consumo annuo di materie prime strategiche dell’Europa (Commissione europea, 2023a). I cosiddetti “progetti strategici” potrebbero beneficiare di procedure di autorizzazione semplificate e di un accesso agevolato ai finanziamenti. La proposta migliorerebbe anche la capacità dell’UE di monitorare e attenuare il rischio di approvvigionamento connesso alle materie prime critiche. Inoltre, essa aumenterebbe la circolarità dei mercati delle materie prime critiche e ridurrebbe la loro impronta ambientale.

Il Consiglio ha approvato un mandato negoziale il 30 giugno e il Parlamento ha approvato la sua posizione il 14 settembre, sulla base della relazione della Commissione per l’industria, la ricerca e l’energia – ITRE. I negoziati interistituzionali si sono conclusi il 13 novembre. Il Coreper ha approvato il testo il 29 novembre e la commissione ITRE il 7 dicembre. Il parametro di riferimento per la capacità di riciclaggio di materie prime strategiche dell’UE è stato aumentato al 25% del consumo annuo di SRM dell’UE entro il 2030. L’UE dovrebbe essere in grado di riciclare una quantità crescente di ciascuna materia critica strategica presente nei rifiuti. La Commissione e gli Stati membri dovranno intraprendere sforzi per incentivare il progresso tecnologico e l’uso efficiente delle risorse al fine di contenere il previsto aumento del consumo di materie prime critiche nell’UE (Ragonnaud, 2023). Entro il 1° gennaio 2027, la Commissione adotterà un atto delegato al fine di stabilire parametri di riferimento per ciascuna materia prima strategica contenuta nei pertinenti flussi di rifiuti. La durata della procedura di rilascio delle autorizzazioni per i “progetti strategici” non dovrebbe essere superiore a 27 mesi per i progetti strategici che riguardano l’estrazione e a 15 mesi per i progetti strategici che riguardano la trasformazione e il riciclaggio – il tempo necessario per elaborare una relazione sulla valutazione dell’impatto ambientale non sarà incluso nella durata

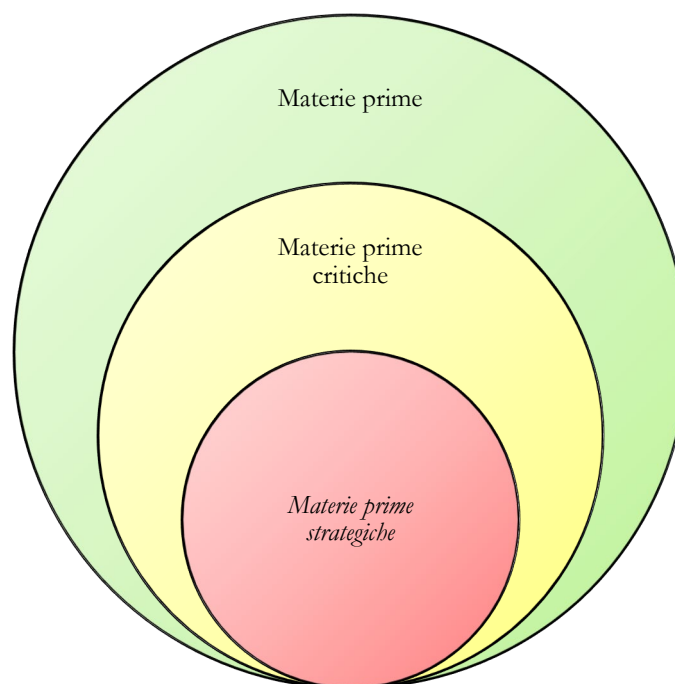
della procedura di rilascio delle autorizzazioni. Vi sarà un solo punto di contatto unico per livello amministrativo pertinente e per fase della catena del valore delle materie prime critiche per ciascuno Stato membro. La Commissione adotterà atti delegati per stabilire in contenuto riciclato minimo nei magneti permanenti per alcune materie prime critiche recuperate dai rifiuti entro il 31 dicembre 2031 (Ragonnaud, 2023).

1.2 Obiettivi della ricerca

Al termine della sezione precedente si è dato risalto alla nuova proposta di regolamento europeo – *Critical Raw Materials Act* – perché in esso e negli studi complementari, redatti su impulso della Commissione, non vengono soltanto delineate le azioni che l'Unione intraprenderà per competere efficacemente nel campo dell'approvvigionamento e della produzione delle materie prime critiche ma si introduce anche un'ulteriore categoria di importanti risorse a rischio: le materie prime strategiche. Su queste ultime si concentra il presente lavoro di tesi.

Come si è già avuto modo di scrivere, le materie prime strategiche – *strategic raw materials*, SRM – rappresentano un ulteriore gruppo di risorse la cui importanza e i cui rischi, legati alla produzione e all'approvvigionamento, sono ancora maggiori rispetto alle materie prime critiche. Per una più immediata comprensione e visualizzazione è stato predisposto il seguente diagramma che illustra relazioni tra le diverse risorse.

Schema n. 1 – Diagramma della relazione tra materie prime critiche e strategiche nell'UE.



Fonte: elaborazione su studi e documenti della *Commissione europea*.

Nello Schema n. 1 si può notare che il cerchio in verde corrisponde alle materie prime di cui l'Unione europea può disporre abbastanza liberamente, generalmente a buon mercato e che non risentono di particolari problemi per il loro approvvigionamento. In giallo, invece, sono evidenziate le materie prime critiche che rivestono una particolare importanza industriale ed economica per i paesi europei e che soffrono di difficoltà potenziali o attuali nel loro approvvigionamento. Infine, in rosso vi sono le materie prime strategiche che, pur essendo quasi tutte comprese nel precedente raggruppamento, possiedono alcune caratteristiche particolari che richiedono una "classificazione" a parte. Come già accennato poco sopra, queste risorse, infatti, oltre ad essere soggette a rischi di approvvigionamento ancora maggiori rispetto alle materie prime critiche, sono pressoché indispensabili per alcuni settori strategici, in base agli obiettivi europei relativi alla doppia transizione verde e digitale, nonché per le industrie dell'aerospazio e della difesa. A ciò va aggiunto che vi è un divario tra l'attuale produzione degli *strategic raw materials* – SRM – e le stime sulla loro domanda nel prossimo futuro:

la produzione non riuscirebbe a stare al passo con le richieste delle industrie dedite alla loro trasformazione e delle imprese manifatturiere. Quindi, le materie prime strategiche sono le risorse “non energetiche” – ovvero, ad esclusione dei combustili fossili, nucleari e affini – più importanti in questo momento storico per l’Unione europea.

Partendo da queste necessarie premesse, l’obiettivo della presente ricerca di tesi è quello di “quantificare” l’approvvigionamento di materie prime strategiche a rischio. Ovvero, individuare la quota di import di ogni *strategic raw materials* che potrebbe subire verosimilmente interruzioni. Quindi, la domanda di ricerca che muove l’intera tesi si può riassumere come segue: a quanto ammontano le quote di approvvigionamento a rischio delle materie prime strategiche per l’Unione europea?

L’obiettivo e la domanda di ricerca sono stati stimolati da diverse circostanze. La prima risiede senza dubbio nella constatazione – emersa tramite lo studio dei documenti delle istituzioni europee e dall’analisi della letteratura di riferimento – dell’enorme importanza, non solo economica, delle risorse oggetto di indagine. La seconda riguarda l’evoluzione di questo lavoro di tesi che era partito inizialmente da premesse e obiettivi simili ma rivolto, in sostanza, alle materie prime critiche. La prospettiva è cambiata nel corso dell’ultimo anno con il lancio della proposta legislativa europea – il *Critical Raw Materials Act* (Commissione europea, 2023a) –, che introduceva anche la categoria delle materie prime strategiche, e dei relativi studi che ne hanno accompagnato il percorso (Carrara et al., 2023; Commissione europea, 2023b). Questa “novità” ha offerto l’opportunità di essere fra i primi a effettuare un lavoro di ricerca sul nuovo gruppo di risorse individuato dalle istituzioni europee.

La terza ragione che sta alla base dell’obiettivo di ricerca risiede nella diversa prospettiva assunta e, quindi, nel diverso metodo impiegato. Risulta importante, dunque, sottolineare che lo scopo non è quello di fornire un’altra, diversa, valutazione della criticità di queste risorse: quest’operazione è stata già effettuata dalle istituzioni europee e dai ricercatori a cui sono stati commissionati gli studi già menzionati finora. La criticità e la strategicità delle materie prime in esame è stata già stabilita: quello che si mostrerà nel proseguo del lavoro di tesi è, invece, una quantificazione delle quote di import a rischio delle materie prime strategiche.

Infine, in subordine vi è anche un altro obiettivo a cui mira questa ricerca: avviare una riflessione sulla cosiddetta “autonomia strategica aperta” – *open strategic autonomy* – che da qualche anno è il paradigma europeo nelle proprie relazioni internazionali con i paesi – e i gruppi

di paesi – terzi. Si ragionerà, quindi, su come i risultati dell’analisi effettuata per rispondere alla prima, e principale, domanda di ricerca potrebbero influenzare le possibilità europee di dar seguito alla propria autonomia strategica.

2 Metodo e letteratura sul metodo

Si procederà ora ad illustrare il metodo con il quale si è cercato di rispondere alla principale domanda di ricerca. Si tratta di un metodo quantitativo poiché, come già scritto, si è inteso innanzitutto “quantificare” il rischio nell’approvvigionamento europeo di ogni materia prima strategica valutando in questo modo anche parte dell’autonomia strategica europea. L’analisi quantitativa sarà condotta tramite lo strumento del *Geopolitical Supply Risk* – una sorta di indicatore di rischio geopolitico nell’approvvigionamento – sviluppato da diversi studiosi. Ogni ricercatore, ogni gruppo di ricerca, ha sviluppato una propria versione di questo strumento aggiungendo o sottraendo fattori e caratteristiche a seconda dell’obiettivo della propria analisi. Tuttavia, pur tenendo in debito conto le differenze nelle sue diverse versioni, occorre sottolineare che questo metodo è stato ideato nell’ambito degli studi sulla valutazione del ciclo di vita – *life cycle assessment*, LCA – e delle ricerche sulla valutazione della sostenibilità del ciclo di vita – *life cycle sustainability assessment*, LCSA – di un prodotto o di una risorsa. Il fine era innestare in queste metodologie una discriminante geopolitica. In questa sezione si introdurrà prima il metodo e gli strumenti scelti, fornendo poi una sintesi della letteratura.

2.1 Metodo

Esistono diversi metodi per valutare il rischio di approvvigionamento delle risorse. Un’ampia gamma di indicatori aggregati è stata utilizzata in diverse pubblicazioni sulla valutazione delle criticità al fine di confrontare il potenziale rischio di approvvigionamento delle risorse a diversi livelli, sia esso globale, regionale o aziendale (Achzet & Helbig, 2013). Nella maggior parte dei casi, sia la concentrazione dell’offerta, valutata con l’indice Herfindahl-Hirschman – HHI –, sia i *Worldwide Governance Indicators* – WGI – della Banca Mondiale, che

misurano la qualità relativa della governance di un paese, sono entrambi utilizzati per la valutazione del rischio nell'approvvigionamento (European Commission, 2010).

I punteggi WGI sono generalmente ponderati in base alla quota media di produzione (European Commission, 2017). Tuttavia, in tal modo, il rischio geopolitico nell'approvvigionamento – *Geopolitical Supply Risk* – viene espresso come un attributo intrinseco del mercato mondiale delle materie prime, che trascura le particolarità regionali o le diverse catene di approvvigionamento. Il metodo che si è scelto di seguire, invece, differisce dai precedenti. Esso si basa sul lavoro di Gemechu e al. (2016) che pondera i punteggi WGI in base alle quote di importazione. Tale ricerca assume che si possa osservare un rischio diretto nell'approvvigionamento a seconda dell'instabilità dei partner commerciali più importanti, piuttosto che dei produttori globali. In questi casi, laddove un paese di approvvigionamento è in realtà un centro commerciale di scambio di materie prime e non possiede una produzione interna, si ritiene che i rischi della catena di approvvigionamento siano raggruppati e rappresentati dall'instabilità di questo unico partner commerciale. L'affidabilità contrattuale del partner commerciale diretto e le scorte fisiche esistenti nei centri di negoziazione sono ulteriori motivi per propendere verso questa ipotesi di rappresentazione del rischio. Mentre la stabilità della governance dei paesi di origine indica il rischio medio di interruzione dell'approvvigionamento nel suo complesso, la concentrazione del mercato indica la capacità complessiva del mercato di ristrutturare i flussi commerciali al fine di compensare la diminuzione o l'interruzione dell'approvvigionamento dai paesi instabili. La concentrazione della produzione globale viene calcolata con l'HHI ed entra nel calcolo come fattore moltiplicativo di mitigazione del rischio. Il modello è descritto nella seguente equazione.

Equazione n.1 – Rischio geopolitico nell'approvvigionamento

$$SR_{c,i} = \left[\left(\sum_{k=1}^n s_k^2 \right) \cdot \left(\sum_{k=1}^n g_k \cdot f_{i,k} \right) \right]$$

Fonte: Gemechu et al. 2016.

$SR_{c,i}$ esprime il rischio di approvvigionamento del paese valutato i per quanto riguarda la risorsa di interesse c ; s_k è la quota del paese k nella produzione globale – estrazione mineraria o raffinazione – della materia prima c ; g_k è l'indicatore di instabilità politica del paese k , che deriva dal WGI, e $f_{i,k}$ è la quota di importazioni del paese k nella catena di approvvigionamento del paese i .

Analogamente all'impatto ambientale del “punto medio” nella valutazione dell'impatto del ciclo di vita – *life cycle impact assessment*, LCIA (Schneider et al., 2014) –, il rischio geopolitico nell'approvvigionamento del metodo proposto è espresso come fattore di caratterizzazione del punto medio – *midpoint characterization factor*⁴ – in una valutazione della sostenibilità del ciclo di vita – *life cycle sustainability assessment*, LCSA – con valori compresi tra 0 e 1, che indicano la quota dell'import di materie prime a rischio, assumendo una relazione lineare tra il punteggio WGI e la probabilità di interruzione dell'approvvigionamento (Graedel et al., 2012).

I dati necessari per il calcolo del rischio geopolitico nell'approvvigionamento sono costituiti da tre parti: la prima è la distribuzione globale della produzione a livello nazionale, che di solito è disponibile presso gli istituti geologici nazionali, le organizzazioni internazionali oppure presso società commerciali private che si occupano di materie prime. In secondo luogo, la distribuzione delle importazioni, che può essere fornita da istituti nazionali o regionali o, se i dati sono richiesti per più paesi importatori, da banche dati statistiche sul commercio internazionale. La terza parte è la stima essenziale dell'instabilità dei paesi di origine.

Per quanto riguarda la produzione mondiale nelle attività minerarie o di raffinazione, sono stati utilizzati i dati dell'U.S. Geological Survey (2023) e del World Mining Data (Reichl, Schatz, & Masopust, 2023). Queste due fonti forniscono dati specifici per paese, liberamente disponibili, come la produzione annuale e le riserve stimate.

Il volume delle importazioni di materie prime è stato estratto dallo UN Comtrade, che è fornito gratuitamente dalla Divisione statistica delle Nazioni Unite (UNCOMTRADE, 2022). Inoltre, è stata anche utilizzata la banca dell'Eurostat relativa al commercio

⁴ Nel contesto della valutazione dell'impatto del ciclo di vita – *life cycle impact assessment*, LCIA –, i fattori di caratterizzazione del punto medio – *midpoint characterization factors* – sono un tipo di rappresentazione quantitativa che fornisce un indicatore per il confronto degli interventi ambientali a un livello di catena di causa-effetto tra le emissioni o il consumo di risorse verso il livello finale (Charpentier Poncelet et al., 2022).

internazionale di beni - *Comext Database* – utilizzando il *dataset* “importazioni extra-UE dal 2010 per paese di origine e paese di spedizione” (EUROSTAT, 2023). A causa delle diverse prassi contabili, possono verificarsi differenze tra le cifre delle importazioni dichiarate nei paesi d’arrivo e la quantità delle esportazioni dichiarata dal paese di provenienza. I problemi di riservatezza sono una ragione frequente di queste incongruenze. Nell’applicazione presentata del metodo sono presi in considerazione solo i volumi delle importazioni dichiarati.

Ci sono alcune limitazioni dei dati utilizzati dallo UN Comtrade e sono state fatte alcune ipotesi di base. Una delle sfide nell’affrontare il rischio geopolitico di approvvigionamento delle risorse è l’elevato fabbisogno di dati per modellare l’intera catena di approvvigionamento: il flusso di risorse dall’estrazione, dalla lavorazione e dalla raffinazione, fino ad arrivare al sito di produzione. Poiché sono coinvolti diversi paesi, sono necessari dati specifici nella catena di approvvigionamento della risorsa. Il rischio geopolitico di approvvigionamento dovuto all’importazione di risorse non proviene solo dai fornitori di primo livello, ma piuttosto è il rischio cumulativo di tutti i paesi coinvolti nella catena di approvvigionamento. Tuttavia, poiché i dati di UN Comtrade ed Eurostat non forniscono informazioni dettagliate su dove si sono verificati esattamente i processi di estrazione, lavorazione e raffinazione, si è scelto di presumere – come, del resto, avevano fatto i ricercatori il cui studio è stato preso ad esempio – che tutti i processi si siano verificati nello stesso paese (Gemechu et al., 2016).

Considerando il rischio geopoliticamente correlato che emerge da specifici paesi, sono stati utilizzati i WGI, aggregati e pubblicati dalla Banca Mondiale. La metodologia WGI unisce diverse classifiche e valutazioni, pubblicate individualmente, sulla qualità della governance dei paesi e le aggrega in sei meta-indicatori. Per quanto riguarda il rischio geopolitico di approvvigionamento di un paese, l’indicatore della Banca Mondiale “stabilità politica e assenza di violenza o terrorismo” – *political stability and absence of violence/terrorism*, WGI-PV –, è stato considerato, tra i sei meta-indicatori, come miglior approssimazione per la probabilità di interruzione dell’offerta. Questo uso selettivo dei punteggi WGI è già stato utilizzato in altre valutazioni di criticità (Graedel et al., 2012; Schneider et al., 2014).

2.2 Letteratura sul metodo

Il metodo prescelto per questa ricerca – rischio geopolitico nell’approvvigionamento – deriva direttamente dall’applicazione che ne hanno fatto Gemechu et al. (2016). L’articolo si concentra sulla valutazione del rischio geopolitico nell’approvvigionamento di quattordici risorse importate dalle sette principali economie avanzate e dai cinque paesi emergenti più rilevanti. A differenza di alcuni studi precedenti, gli autori propongono un nuovo metodo di calcolo per il rischio geopolitico nell’approvvigionamento, che è differenziato per paese sulla base della struttura delle importazioni, invece che sulla distribuzione della produzione globale. I risultati suggerivano che gli elementi delle terre rare, il tungsteno, l’antimonio e il berillio presentano generalmente un elevato rischio di approvvigionamento geopolitico. Tale ricerca aveva come obiettivo ampliare l’ambito di applicazione del *life cycle sustainability assessment* – LCSA – dalla sola valutazione delle prestazioni ambientali a uno strumento di valutazione del rischio di approvvigionamento delle risorse che includesse l’accessibilità dovuta all’instabilità politica e alla concentrazione del mercato.

Un altro studio presenta una panoramica storica, tracciata sugli ultimi tre decenni, dello sviluppo del rischio geopolitico nell’approvvigionamento di cinquantadue metalli e sviluppa una valutazione di tale rischio per il futuro, fino al 2050. È inclusa anche una mappatura geografica della produzione primaria di metalli nel 1994 e nel 2013 che ne mostra lo spostamento dalle economie sviluppate alle economie in via di sviluppo. Questa analisi dimostra che il rischio geopolitico nell’approvvigionamento di metalli ha oscillato negli ultimi due decenni a causa del cambiamento nel numero e nelle quote di produzione dei diversi paesi. Durante questo periodo, la quota cinese nella produzione globale di metalli è aumentata dal 23% al 44%. La Cina è anche il fornitore dominante di trentaquattro metalli, di cui ventitré rientrano tra le materie prime critiche individuate dalla Commissione europea. Il rischio geopolitico dell’offerta dipende dall’ubicazione delle risorse geologiche attuali e dalle scoperte future, nonché dallo sviluppo tecnologico per migliorare la redditività dell’estrazione delle risorse che attualmente non sono economicamente attraenti (Habib, Hamelin, & Wenzel, 2016).

Lo stesso gruppo di ricercatori che aveva introdotto il rischio geopolitico nell’approvvigionamento nel LCSA – Gemechu, Helbig, Sonneman, Thorenz e Tuma – nello stesso anno, insieme ad altri studiosi ha ulteriormente esteso il suo campo d’applicazione. Il nuovo

studio estendeva il metodo di valutazione del rischio geopolitico nell'approvvigionamento, per quanto riguarda la valutazione della sostenibilità del ciclo di vita – *life cycle sustainability assessment*, LCSA –, per tenere conto delle catene di approvvigionamento multistadio e della produzione nazionale applicando questo metodo esteso alla catena di approvvigionamento delle fibre di carbonio a base di poliacrilonitrile. In particolare, l'articolo stima i fattori di rischio geopolitico nell'approvvigionamento emergenti dal commercio internazionale di petrolio, propene e acrilonitrile. I risultati mostrano l'applicabilità del fattore di caratterizzazione del rischio geopolitico nell'approvvigionamento adattato a una catena di fornitura a più fasi con diverse materie prime scambiate a livello internazionale nell'industria petrolchimica. Così facendo, il metodo serve a integrare ulteriormente la valutazione del ciclo di vita e la dimensione socioeconomica degli impatti delle risorse naturali (Helbig et al., 2016).

Nel corso del 2017, una parte dei ricercatori che aveva contribuito al precedente studio – Pillain, Gemechu e Sonnemann – hanno collaborato a una nuova ricerca. Il loro lavoro mirava all'identificazione e alla combinazione di indicatori che consentissero di valutare la sostenibilità per il settore del riciclaggio della fibra di carbonio. La selezione degli indicatori fu effettuata eseguendo un'ampia revisione della letteratura sulle pubblicazioni esistenti che trattavano i diversi pilastri della sostenibilità e stabilendo una serie di criteri di selezione per dare priorità agli indicatori rilevanti per il settore. Per quanto riguarda l'aspetto ambientale, il riscaldamento globale, l'acidificazione e la tossicità sembravano essere i più rilevanti. L'aspetto socioeconomico poteva essere affrontato considerando il rischio di approvvigionamento dovuto alla scarsità geologica di una risorsa nonché la potenziale interruzione dell'approvvigionamento dovuta a fattori geopolitici e altri fattori sociali. I risultati mostravano che erano stati individuati tre indicatori che consentivano la valutazione del pilastro ambientale. Quindi, la necessità di utilizzare indicatori di risorse aggiuntive fu mostrata e giustificata con il dover necessariamente adottare una prospettiva temporale più breve, nonché di considerare la quantità di fibra da riciclare in futuro e anche di determinare il potenziale beneficio fornito dalla creazione di questo settore dal punto di vista della strategia delle risorse. Ciò è stato reso possibile utilizzando metodi come la valutazione della criticità che hanno consentito di considerare il rischio di approvvigionamento geologico e geopolitico, nonché la caratterizzazione della dipendenza del sistema da una risorsa specifica. Infine, questi risultati hanno portato alla chiarificazione della necessità di sviluppare un nuovo indicatore che valuti la criticità delle

fibre di carbonio, nonché all'espressione della necessità di ulteriori ricerche sulle prospettive socioeconomiche (Pillain, Gemechu, & Sonnemann, 2017).

Nello stesso anno, il gruppo di ricerca che aveva prodotto il primo studio descritto in questa sezione (Gemechu et al., 2016), con l'aggiunta di altri studiosi, ha esteso e applicato il metodo ad altri prodotti. L'articolo in questione ha sviluppato la metodologia del rischio geopolitico nell'approvvigionamento proponendo un modello di caratterizzazione per quantificare il rischio di fornitura del prodotto in relazione a un'unità funzionale nell'ambito del quadro di valutazione della sostenibilità del ciclo di vita. Il modello di caratterizzazione si basava su un meccanismo socioeconomico causa-effetto che attinge ai concetti di resilienza della catena di fornitura. Il rischio nell'approvvigionamento – o “criticità” – di un dato “prodotto intermedio” è definito come il multiplo tra la probabilità di interruzione della fornitura e la vulnerabilità all'interruzione della fornitura. Venivano proposte due forme di realizzazione del modello di caratterizzazione, ciascuna integrando gli indicatori di probabilità precedentemente sviluppati con diversi indicatori di vulnerabilità. Essi venivano dimostrati con uno studio di caso comparativo di un veicolo elettrico e di un veicolo con motore a combustione interna. I risultati erano molto sensibili al modo in cui viene misurata la vulnerabilità ed erano sorte numerose complicazioni metodologiche. Tale modello di caratterizzazione del rischio di approvvigionamento geopolitico mostrava l'importanza di integrare le considerazioni sulla criticità delle materie prime nella valutazione della sostenibilità del ciclo di vita per informare meglio le decisioni di gestione a livello di prodotto (Cimprich et al., 2017). Uno degli autori della precedente ricerca, insieme ad altri studiosi, ne ha ulteriormente ampliato l'ambito di applicazione. Il metodo del rischio geopolitico nell'approvvigionamento è stato utilizzato stavolta per costruire degli indicatori di “sostituibilità” dei materiali applicati ai veicoli elettrici e alle apparecchiature radiologiche odontoiatriche (Cimprich, Karim, & Young, 2018).

Un altro studio, finalizzato alla valutazione della criticità delle risorse per i veicoli elettrici, aveva modellato tre scenari principali considerando la domanda futura di veicoli elettrici in cinque regioni geografiche entro il 2050. I metalli principali analizzati erano alluminio, cobalto, rame, ferro, litio, manganese, nichel e due elementi delle terre rare: neodimio e disprosio. I risultati della “scenarizzazione” mostravano un aumento del numero totale di veicoli elettrici da 1,13 miliardi nel 2011 a 2,6 miliardi nello scenario di base, a 2,55 miliardi nello scenario moderato e a 2,25 miliardi nello scenario più dinamico entro il 2050. Le riserve

geologiche di cobalto, litio e nichel dovranno verisimilmente affrontare una pressione maggiore derivante dalla crescente domanda di questi metalli per le batterie dei veicoli elettrici. Nel caso delle terre rare, invece, il fattore geopolitico di rischio nell'approvvigionamento diventa importante a causa della concentrazione del mercato esistente. Il riciclaggio e la sostituzione tecnologica a vari livelli sembrano ridurre la vulnerabilità dei veicoli elettrici al crescere del rischio geologico e geopolitico nell'approvvigionamento di queste risorse (Habib, Hansdóttir, & Habib, 2020).

Altri ricercatori hanno esteso ulteriormente il metodo per considerare il potenziale di mitigazione del rischio geopolitico offerto dal riciclo interno ai singoli paesi, proponendo così considerazioni sulle strategie di economia circolare per la gestione della criticità dei materiali. Lo studio individuava due meccanismi attraverso i quali il riciclaggio domestico può influenzare il rischio di approvvigionamento: una riduzione delle importazioni totali – l'effetto di riduzione – e una potenziale redistribuzione nella composizione delle importazioni – l'effetto redistributivo. Si sono presi in considerazione una serie di risultati, dallo scenario migliore – sostituzione delle importazioni dai partner commerciali più rischiosi – allo scenario peggiore – sostituzione delle importazioni dai partner commerciali meno rischiosi. In tale ricerca, inoltre, si è testato uno strumento di calcolo automatizzato, che ha migliorato significativamente l'applicabilità pratica del metodo facilitando i calcoli richiesti altrimenti onerosi, testando il metodo su tredici materie prime utilizzate per le tecnologie dell'informazione e della comunicazione nell'Unione europea. L'ipotesi testata dalla ricerca è che il riciclaggio mitighi il rischio di approvvigionamento. La realtà sembra, tuttavia, più complessa. Per massimizzare la mitigazione del rischio, il riciclaggio dovrebbe idealmente avvenire a livello nazionale, il materiale riciclato dovrebbe essere reinserito nell'economia nazionale e la composizione delle importazioni assume particolare rilievo considerato che l'effetto di redistribuzione a volte supera l'effetto di riduzione (Santillán-Saldivar et al., 2021).

Nello stesso anno, un'ulteriore evoluzione del *Geopolitical Supply Risk* si è avuta con l'introduzione del *GeoPolEndpoint*, un indicatore che misura il danno socioeconomico derivante dall'utilizzo delle risorse minerarie legate all'area della tutela delle risorse naturali nell'ambito del *life cycle assessment* – LCA –, ovvero di quelle metodologie che cercano di valutare l'impronta ambientale di un prodotto o di un servizio, lungo il suo intero ciclo di vita. Si sono introdotte considerazioni sull'elasticità dei prezzi e si sono modellati i potenziali effetti

delle interruzioni dell'offerta sui mercati delle materie prime sotto forma di perdita di benessere e perdita di *surplus* del consumatore. Il danno socioeconomico si verifica a causa dell'aumento dei costi delle materie prime, guidato dalla geopolitica. Questo nuovo strumento di indagine scientifica è stato così testato su alluminio, cobalto, nichel e rame, materiali rilevanti per le batterie agli ioni di litio. I risultati mostrano che il nichel e il cobalto dominano il contributo ai danni socioeconomici a causa del loro prezzo e del rischio di approvvigionamento; si è stimato che l'impatto di contesti geopolitici instabili, o in rapido deterioramento, sull'uso dei quattro materiali analizzati potrebbe portare a un potenziale aumento del costo che varierebbe da 0,30 a 1,86 dollari per kWh a seconda della tecnologia e dell'anno (Santillán-Saldivar, Gaugler, et al., 2021).

Successivamente, alcuni ricercatori che avevano lavorato a diversi degli studi presentati finora hanno redatto un lavoro che integra sia il *Geopolitical Supply Risk* che il metodo *GeoPolEndpoint* inserendo tale ricerca sempre nell'ambito del *life cycle assessment*. In sostanza, si utilizza il *GeoPolEndpoint* come un'estensione del metodo basato sul *Geopolitical Supply Risk* per quantificare gli impatti dell'uso delle materie prime dal punto di vista della criticità. Lo studio, tramite l'armonizzazione di questi due metodi, tiene conto del flusso di massa estratto per un prodotto o una risorsa. Si sono presi in considerazione gli impatti di quattro metalli rilevanti dal punto di vista dell'UE nel ciclo di vita delle batterie agli ioni di litio per gli anni dal 2015 al 2017. Nell'ambito della valutazione integrata, i risultati mostrano che delle materie prime analizzate, rame e nichel contribuiscono in modo significativo agli impatti ambientali; tuttavia, il cobalto ha un indicatore di rischio geopolitico elevato per l'approvvigionamento e un contributo ancora più elevato al *GeoPolEndpoint* nonostante il suo apporto relativamente basso all'impronta ambientale delle batterie agli ioni di litio. I risultati mostrano l'importanza di alcune materie prime che, seppur presenti in quantità relativamente piccole in un prodotto, hanno tuttavia un impatto elevato quando si tiene conto delle loro criticità geopolitiche. In conclusione, lo studio suggerisce che gli impatti derivanti dall'utilizzo di materie prime ritenute critiche non si limitano solo alla dimensione ambientale ma possono influenzare, non marginalmente, le economie e le società dei paesi importatori. I metodi presi in considerazione consentono l'integrazione di un'altra prospettiva di rischio geopolitico nell'approvvigionamento negli studi sulla valutazione del ciclo di vita. Con l'introduzione e lo sviluppo di nuove tecnologie, la valutazione della criticità delle materie prime diventa un importante

complemento agli indicatori ambientali. Questo studio ha fornito un'altra base per future applicazioni del metodo a prodotti e tecnologie che richiedono l'uso di materie prime critiche durante tutto il loro ciclo di vita (Santillán-Saldivar et al., 2022).

Un'altra ricerca analizza il rischio nell'approvvigionamento delle materie prime utilizzate nelle batterie e lo confronta con il rischio nell'approvvigionamento di combustibili fossili nel periodo dal 2000 al 2018 per Unione Europea, Stati Uniti, Corea del Sud, Giappone, Canada e Australia utilizzando il metodo del *Geopolitical Supply Risk*. L'analisi dimostra un rischio di approvvigionamento delle materie prime minerarie in questione più elevato rispetto a quello dei combustibili fossili per tutti i territori selezionati. Gli elementi delle terre rare, la grafite e il magnesio, sono tra le materie prime con il rischio di approvvigionamento più elevato a causa della loro produzione concentrata in uno o in pochi paesi. Si dimostra ancora una volta che la sicurezza delle materie prime è una preoccupazione emergente per tutti i paesi: soprattutto nel caso delle risorse necessarie per le batterie nei principali paesi produttori che dipendono fortemente dalle importazioni. I paesi produttori di materie prime come il Canada e l'Australia si sono concentrati sullo stoccaggio di minerali e sull'esplorazione mineraria, mentre i paesi importatori come il Giappone e la Corea del Sud sono alla ricerca di fonti alternative per il loro approvvigionamento. I risultati della ricerca suggeriscono che le necessarie riforme politiche intraprese per la sicurezza energetica hanno portato benefici a tutti i paesi con un rischio ridotto nell'approvvigionamento di combustibili fossili, mentre politiche simili per garantire le materie prime critiche sono discusse ma non ancora pienamente attuate (Koyamparambath et al., 2022).

Infine, il metodo del rischio geopolitico nell'approvvigionamento è stato utilizzato anche per valutare il rischio nell'import di elio per dieci paesi dipendenti in larga parte dalle importazioni dal 2015 al 2019. I risultati di tale studio mostrano che le importazioni di elio hanno un indicatore di rischio relativamente alto – 0,15-0,30 – coerente con la sua classificazione “critica”. Il crescente utilizzo dell'elio, in particolare in Asia orientale, fa scorgere per il futuro più di una sfida per il suo approvvigionamento (Siddhantakar et al., 2023).

3 Letteratura e stato dell'arte

Prima di procedere con l'analisi e la discussione dei dati, si procederà con l'illustrazione della letteratura e dello stato dell'arte sulle materie prime critiche in generale e su quelle strategiche in particolare. In realtà, su quest'ultima categoria di risorse – così come intesa dalle istituzioni europee – non sono stati rinvenuti molti contributi scientifici oltre agli studi che hanno accompagnato l'ultima proposta legislativa europea in merito. Come si può immaginare, i contributi esaminati per gli *strategic raw materials* europei si concentrano tutti nel 2023.

La letteratura sulle materie prime strategiche si sofferma sulle possibilità di riciclo di alcune di esse, in particolare sulle terre rare che vengono utilizzate più spesso nelle batterie – neodimio, praseodimio e disprosio – testando diversi metodi di recupero (Romano et al., 2023), oppure si valuta il potenziale degli impianti di smaltimento dei rifiuti minerari abbandonati per il recupero di materie prime critiche e strategiche e di altri elementi di rilevanza economica (Rosario-Beltré et al., 2023).

Altre ricerche, analizzando sistematicamente le diverse liste di materie prime critiche e strategiche pubblicate nel corso degli anni, evidenziano problemi e propongono soluzioni alternative per migliorare la metodologia di valutazione della criticità (Zhang et al., 2023). Alcuni studi si soffermano sull'analisi di una particolare materia prima strategica, come il litio, e sulla valutazione della resilienza delle sue catene di approvvigionamento (Hao et al., 2023), mentre altri prendono in considerazione complessivamente le sfide e le opportunità che sono emerse con il *Critical Raw Materials Act* (Gauß, Gellermann, & Maurer, 2023; Hool, Helbig, & Wierink, 2023).

La letteratura sulle materie prime critiche – categoria che, invece, in Europa aveva visto la luce almeno dal 2011 – è molto più ampia e articolata. Per questo motivo, e per dar conto della ricchezza degli studi su queste risorse, di seguito verranno presentati alcuni aspetti peculiari che, sebbene, non riguardino l'oggetto principale della presente ricerca, contribuiscono a chiarire il contesto e a delinearne le caratteristiche. Si introdurrà e approfondirà inizialmente il tema della sfida europea all'approvvigionamento delle materie prime critiche e strategiche, si passerà quindi – nel contesto del pilastro interno delle strategie comunitarie – a esaminare il ruolo che le città hanno nel consumo e nella “ri-produzione” di queste risorse,

infine l'attenzione si concentrerà su un determinato gruppo – estremamente importante per la doppia transizione verde e digitale – di materie prime critiche e strategiche, le cosiddette terre rare.

3.1 Le catene di approvvigionamento europee delle materie prime critiche

3.1.1 Introduzione e scenario

Questa sezione analizza le sfide a cui sono – e saranno – sottoposte le catene di approvvigionamento europee delle materie prime critiche. Tale questione si ricollega al più ampio dibattito accademico e politico sull'autonomia strategica dell'Unione europea all'indomani della pandemia.

Come si è già scritto, le materie prime critiche sono un gruppo di elementi e composti di vitale importanza per l'economia europea e mondiale. Essi comprendono: afnio, antimonio, arsenico, barite, bauxite, berillio, bismuto, borati, carbon coke, cobalto, elio, feldspato, fluorite, rocce fosfatiche, fosforo, gallio, germanio, grafite naturale, litio, magnesio, manganese, metalli del gruppo platino, nichel, niobio, rame, silicio metallico, stronzio, tantalio, terre rare, titanio, tungsteno, vanadio (Grohol & Veeh, 2023).

Come già accennato più volte, grazie alle loro proprietà chimico-fisiche, queste materie prime sono ormai indispensabili per la fabbricazione di semiconduttori, schermi di televisioni e computer, microchip, smartphone, componenti di turbine eoliche, batterie per le automobili elettriche o ibride, superconduttori e molti altri impieghi industriali, tra cui lo sviluppo e la produzione di sistemi d'armamento. Per la loro importanza capitale, in ambito europeo sono stati definiti come “i fattori che renderanno possibile la transizione verde e digitale” (Szczepański, 2020). La loro criticità deriva da valutazioni che si basano su due parametri: l'importanza economica e i rischi connessi al loro approvvigionamento.

Dal 2008 l'Unione europea ha introdotto diverse iniziative volte ad assicurare adeguati rifornimenti di queste materie prime. Dal 2011, ogni tre anni, la Commissione europea pubblica una lista delle materie prime ritenute critiche o essenziali. La tendenza è all'aumento: la prima lista ne elencava quattordici, l'ultima, pubblicata nel 2023, ne annoverava trentaquattro (Grohol & Veeh, 2023; Commissione europea, 2011). In poco più di dieci anni sono più che

raddoppiati. Le maggiori criticità derivano da particolari caratteristiche dello scenario internazionale e dalla distribuzione geografica di queste risorse. Di fatto, la maggior parte delle materie prime critiche vengono importate nell'Unione da paesi terzi. Spesso le nazioni europee sono quasi totalmente dipendenti da altre in questo settore. Per esempio, gli stati europei importano in media dalla Cina il 98% del proprio fabbisogno di “terre rare”, dal Brasile circa l'85% del niobio di cui hanno bisogno e dalla Turchia quasi il 98% dei borati necessari (Szczepański, 2020).

Spesso le materie prime critiche sono associate a contesti caratterizzati da una elevata instabilità sociopolitica oppure sono nelle disponibilità di concorrenti economici e rivali strategici dell'Unione. Inoltre, l'impetuoso sviluppo industriale cinese nonché delle nazioni emergenti in America Latina, Africa e Asia ha stimolato la domanda di questi materiali, aumentandola notevolmente, e ha accelerato la competizione economica e diplomatica per il controllo di tali risorse. Per far fronte a questo scenario, l'Unione europea ha elaborato una strategia fondata su tre pilastri: una maggiore sicurezza delle linee di rifornimento estere, l'approvvigionamento domestico – ovvero interno ai confini comunitari – e l'economia circolare – ovvero il riciclo e lo sfruttamento di fonti secondarie.

3.1.2 Metodo e analisi quantitativa dei risultati

Considerando tale contesto e la strategia europea, la domanda di ricerca che ha guidato lo sviluppo di questa sezione è la seguente: quali sono i punti deboli dell'approccio europeo all'approvvigionamento delle materie prime critiche secondo la letteratura scientifica? Per tentare di rispondere a questa domanda è stato scelto il metodo della revisione sistematica della letteratura.

L'obiettivo principale di una revisione della letteratura è fornire informazioni sulle fonti relative a un determinato argomento. Quindi, è un metodo per sintetizzare studi su una particolare tematica. In questo modo, si riassumono le pubblicazioni disponibili su una specifica questione individuandone tendenze e stato dell'arte. Dopo la definizione della domanda di ricerca, per procedere nella revisione, sono state scelte le banche dati multidisciplinari *Scopus* e *Web of Science* come archivi in rete di articoli scientifici, ampi e meno soggetti di altri ai pericoli di un'eccessiva settorializzazione. La stringa di ricerca è stata sviluppata attorno a tre

sezioni tematico-concettuali: materie prime critiche, Unione europea e catene di approvvigionamento. Mentre per le ultime due sezioni si è provveduto a estendere il raggio della ricerca inserendo alcuni sinonimi, per quanto riguarda la prima si è scelto di non aggiungere altri termini a parte l'acronimo inglese⁵. Si è scelto di procedere in questo modo perché altrimenti si sarebbe corso di rischio di andare oltre l'orizzonte europeo mentre questo contributo si vuole soffermare proprio sulle sfide che l'Unione europea vuole affrontare. Di fatto, le materie prime critiche non sono definite universalmente: liste diverse sono state redatte da diversi paesi rispecchiando differenti interessi economici e preoccupazioni geopolitiche. Per esempio, negli Stati Uniti, a cambiare è anche il nome con cui si designa l'insieme dei materiali indispensabili – *critical minerals* in luogo degli “europei” *critical raw materials* – e non soltanto gli elementi o i composti che lo costituiscono.

Inoltre, si è scelto di restringere la ricerca ai soli documenti disponibili in lingua inglese prendendo in considerazione solo i documenti – principalmente articoli scientifici su riviste – pubblicati dal 2008 al 2021 o con pubblicazione prevista nel 2022⁶. Il limite temporale inferiore della ricerca è stato scelto perché durante quell'anno la Commissione europea diede nuovo slancio all'azione comunitaria sulle materie prime critiche attraverso l'Iniziativa “Materie Prime”, una comunicazione che raccomandava di elaborare una strategia europea integrata e proponeva di redigere una lista comune di materie prime critiche (Commissione europea, 2008).

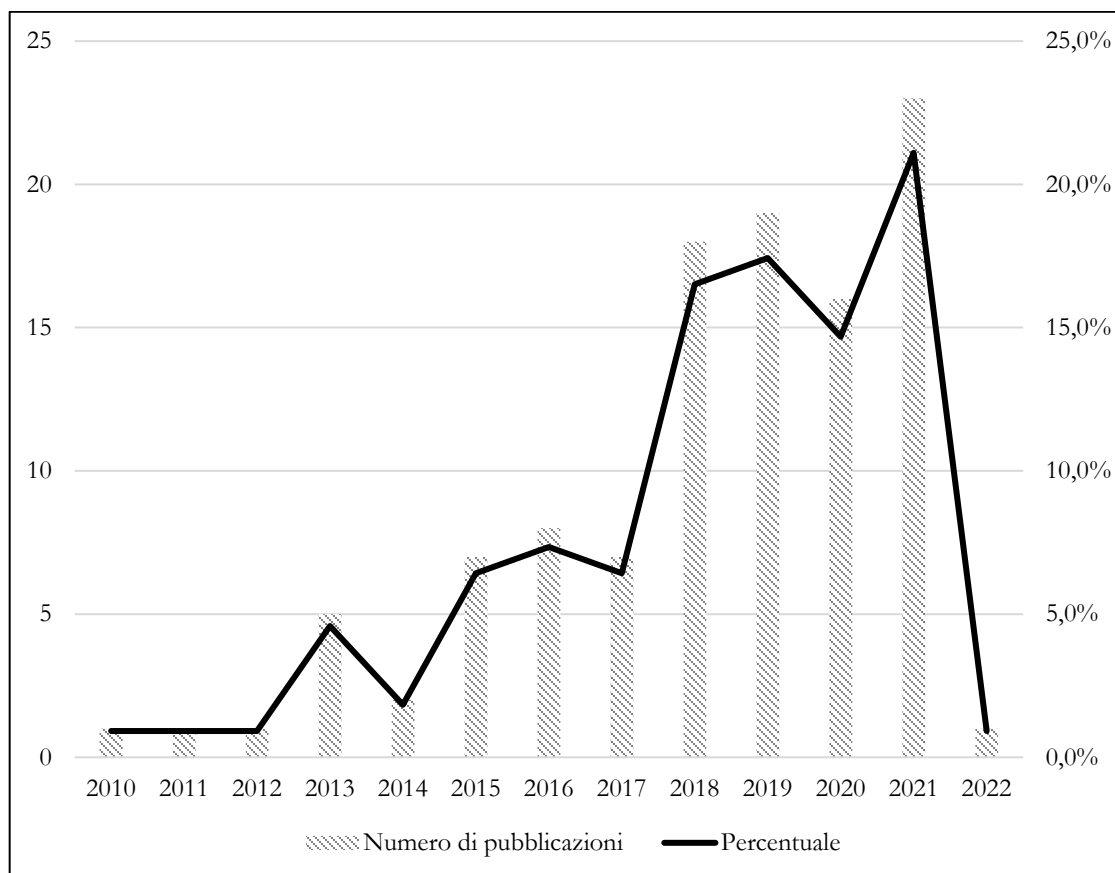
Applicando questi criteri, la ricerca aveva inizialmente prodotto centotrentacinque risultati. In seguito, attraverso la lettura degli abstract, è stata effettuata una prima cernita. Tutti quei documenti in cui la presenza combinata di termini appartenenti alle tre sezioni della stringa di ricerca è solo fortuita sono stati esclusi dalla revisione. Procedendo in questo modo, i documenti rimanenti, coerenti con lo scopo della ricerca, ammontano a centonove, più dell'80% del totale. Come viene mostrato nel Grafico n. 1, Dapprima, la crescita è lenta, poi subisce un'accelerazione tra il 2017 e il 2018. Di fatto, tra il 2018 e il 2020 vengono pubblicate settantasei ricerche, ovvero quasi il 70% dei documenti analizzati: questo dato può

⁵⁵ La stringa di ricerca utilizzata è la seguente: TITLE-ABS-KEY (“critical raw materials” OR CRMs) AND (EU OR “Eu-ropean Union” OR Europe OR “European Commission” OR “European Parliament” OR “European Institutions”) AND (“supply chains” OR supply OR “supply networks” OR “logistic networks”).

⁶ La ricerca, così delineata, è stata effettuata tramite *Scopus* e *Web of Science* il 10 novembre 2021.

rappresentare un'attenzione sempre maggiore della comunità scientifica verso le materie prime critiche.

Grafico n. 1 – Numero di pubblicazioni, per anno

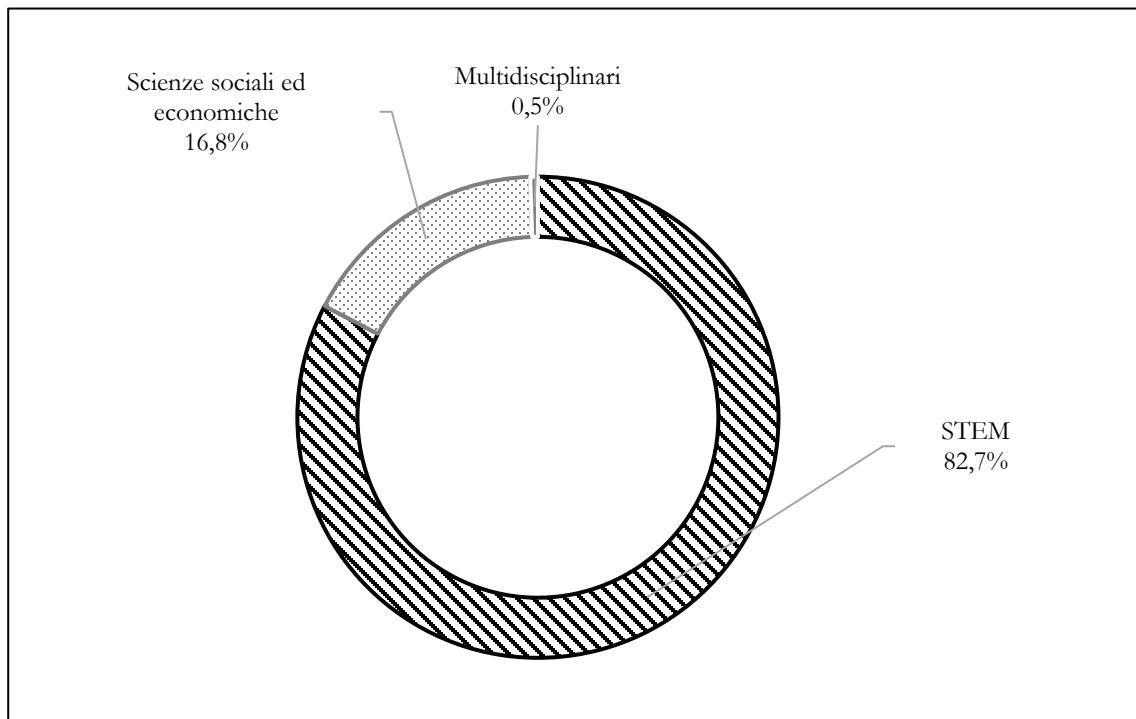


Fonte: elaborazioni su dati *Scopus* e *Web of Science*.

Escludendo lo scritto la cui pubblicazione – a novembre 2021 – era prevista per il 2022, dal 2017, l'unico anno in cui si è registrato un calo delle pubblicazioni è il 2020: una decrescita di quasi il 16% da 19 a 16 pubblicazioni. Questa riduzione può essere messa in correlazione con la pandemia e le relative restrizioni alla mobilità degli individui e delle merci. Come si vedrà a breve, infatti, buona parte delle pubblicazioni appartiene alle scienze naturali, fisiche e matematiche. In questi ambiti, è norma che le ricerche vengano condotte soprattutto sul campo e in laboratorio: “ambienti” che hanno probabilmente risentito delle politiche di distanziamento sociale. Tuttavia, quest'ipotesi e la sua relativa verificano esulano dagli obiettivi di questo contributo.

Per quanto riguarda i settori disciplinari delle pubblicazioni considerate, come mostrato nel Grafico n. 2, un'ampia maggioranza, quasi l'83%, appartiene ai campi delle scienze matematiche, fisiche, naturali e dell'ingegneria – le cosiddette STEM; mentre poco meno del 17% rientra nell'ambito delle scienze sociali e politiche nonché dell'economia.

Grafico n. 2 – Pubblicazioni per macroarea disciplinare.



Fonte: elaborazioni su dati *Scopus* e *Web of Science*.

3.1.3 Sviluppo della revisione e conclusioni

Nell'ambito delle discipline STEM, molti studi si soffermano sul riciclo (Franus, Wiatros-Motyka, & Wdowin, 2015; Dupont, Arnout, Jones, & Binnemans, 2016; Ciacci, Werner, Vassura, & F, 2019), sulla possibile “circolarità” nelle produzioni e negli utilizzi delle materie prime critiche (Tkaczyk, Bartl, Amato, Lapkovskis, & Petranikova, 2018; Gergoric, Barrier, & Retegan, 2019; Ferro & Bonollo, 2019) e sui loro possibili sostituti (Ferro, Bonollo, & Cruz, 2020; Duda & Valverde, 2021; Gonzalez, Wang, Dubus, & Omand Rasmussen, 2020).

Tuttavia, per giungere alle conclusioni, oltre all'analisi quantitativa, è necessario soffermarsi sui punti deboli individuati soprattutto dalle pubblicazioni che rientrano nelle scienze sociali. I risultati della loro analisi mostrano che vi sono almeno tre debolezze nella strategia dell'Unione. La prima è quella riscontrabile nel modo in cui sono state redatte finora le liste delle materie prime critiche: un approccio che privilegia la continuità e la comparabilità rispetto a innovazioni e modifiche. Alcuni autori sostengono che, così facendo, l'Unione possa giungere impreparata e sguarnita di difese a eventuali repentini cambi nello scenario legato a questi materiali (Blengini, et al., 2017; Cimprich, et al., 2019).

La seconda risiede nella mancanza di una vera politica estera comune dell'Unione, nonostante la PESC, che inficerebbe sul nascere la possibilità di seguire una coerente strategia sulle materie prime critiche. Diversi studiosi mostrano sfiducia verso il pilastro esterno della strategia della UE (Paat, Veetil, Karu, & Hitch, 2021; Leonard, J, Shapiro, Tagliapietra, & Wolf, 2021).

Infine, la terza riguarda la scelta di indicatori più solidi per valutare la dimensione geopolitica del rischio negli approvvigionamenti. Alcuni autori sostengono che, oltre al World Governance Index, occorrerebbe introdurre altri indici che tengano conto del livello di conflittualità dei paesi e dei territori nonché delle tensioni geopolitiche internazionali (Santillán-Saldivar, et al., 2021; Koyamparambath, Santillán-Saldivar, Mclellan, & Sonnemann, 2022). Tuttavia, il “come” costruire e armonizzare fra loro questi indici non risulta sempre chiaro: queste difficoltà finora sembrano aver condotto i ricercatori a utilizzare gli indici già a disposizione.

Ciò che emerge dalla revisione effettuata è una crescente attenzione della comunità scientifica per ogni aspetto dell'approvvigionamento delle materie prime critiche in Europa. Ormai la certezza che esse giocheranno un ruolo fondamentale per il futuro dell'Europa stimola riflessioni accademiche che cercano di fornire utili spunti di riflessione non solo per le proprie ricerche ma anche per la comunità economica e politica. Tuttavia, assieme alle opportunità e alle possibili innovazioni vengono sottolineati anche gli aspetti negativi e le aspettative che le nazioni europee dovranno affrontare nel prossimo futuro. Di fatto, se i nodi evidenziati non dovessero essere affrontati, l'autonomia strategica dell'Unione europea, che poggia anche sulle materie prime critiche potrebbe risultare irraggiungibile, fiaccata nei suoi presupposti teorici e materiali.

3.2 Le città e le materie prime critiche: le narrazioni sulla transizione urbana

3.2.1 Introduzione

Come si è accennato in apertura della tesi e ancora nella precedente sezione, la risposta dell'Unione europea alla pandemia è stata quella di utilizzarla per trasformare la sua economia e la sua società. La doppia transizione verde e digitale si basa su materie prime critiche, *critical raw materials* – CRM – (Bobba, Carrara, Huisman, Mathieux, & Pavel, 2020) di importanza strategica per l'economia europea, in particolare per la produzione di dispositivi elettrici ed elettronici, e con un approvvigionamento insicuro.

Nel marzo 2020, la Commissione europea ha adottato un piano per lo sviluppo di una ecologica circolare. Questo piano è stato promosso come uno dei pilastri centrali del *Green Deal* dell'UE, l'agenda europea per la crescita sostenibile. La nuova legislazione si concentra sulla progettazione e la produzione di un'economia circolare, garantendo che le risorse utilizzate siano mantenute nell'economia dell'UE il più a lungo possibile. Ciò significa ridurre gli sprechi e garantire che l'UE disponga di un mercato interno ben funzionante per materie prime secondarie di alta qualità. In particolare, il documento evidenzia il ruolo attivo di primo piano che le città e le comunità locali dovranno assumere nel nuovo paradigma dell'economia circolare (Commissione europea, 2020a).

Entrando in questa prospettiva occorre sempre ricordare che l'Unione europea non sta cercando di sostituire la sua dipendenza dai combustibili fossili con una dai CRM. A tal fine, nel settembre 2020 la Commissione europea ha presentato un nuovo pacchetto di misure. Tra questi, un nuovo piano d'azione per i CRM che delinea quattro linee guida principali: catene del valore resilienti per le industrie dell'UE, estrazione interna sostenibile di materie prime, forniture con approvvigionamento sostenibile da paesi terzi e un migliore uso circolare delle risorse (Bobba, Carrara, Huisman, Mathieux, & Pavel, 2020).

Sebbene la domanda globale di CRM sia in aumento, le restrizioni all'esportazione imposte dai paesi terzi hanno intensificato la concorrenza per i CRM (World Trade Organization, 2020). L'UE ha sviluppato una strategia basata su tre pilastri. Il primo, più vicino al tema generale di questo lavoro di tesi, riguarda le relazioni diplomatiche dell'UE per

la ricerca di nuove fonti di approvvigionamento. Gli altri due pilastri, su cui ci si concentra più specificamente in questa sezione, si concentrano sull'aumento dell'approvvigionamento domestico di CRM (Commissione europea, 2020b).

Secondo questi ultimi due pilastri, il ruolo delle città nei processi di riciclo dei CRM potrebbe essere decisivo. In effetti, molte delle attività di riciclaggio si svolgono nelle aree urbane. Di conseguenza, questa sezione cerca di illustrare qual è la narrazione che si sta sviluppando sul rapporto tra CRM e città all'interno dell'UE. Si è cercato di rispondere a questa domanda attraverso un'analisi condotta seguendo il metodo della revisione sistematica della letteratura.

3.2.2 Metodo

Come accennato nella precedente sezione, l'obiettivo principale di una revisione della letteratura è quello di fornire informazioni sulle fonti relative a un particolare argomento (Ramdhani, Ramdhani, & Amin, 2014). Una revisione della letteratura è un metodo riproducibile per sintetizzare studi esistenti su un argomento (Fink, 2013). Riassume le prove disponibili su un particolare problema fornendo risposte informative: questi studi sintetizzano i risultati di ricerche simili (Boland, Cherry, & Dickson, 2017). Le revisioni sistematiche si concentrano sulla valutazione delle evidenze e del dibattito su un argomento specifico (Haddaway, Woodcock, Macura, & al., 2015). Di solito, le revisioni della letteratura consistono in sei fasi: selezione di una domanda di ricerca, scelta di database bibliografici, determinazione dei termini di ricerca, applicazione dei criteri di screening, revisione e sintesi dei risultati (Fink, 2013).

Prima di definire la banca dati bibliografica, sono state condotte ricerche preliminari. Questo passaggio ha fornito una base di conoscenze sui CRM. In questo modo è stato acquisito il vocabolario fondamentale. Questa fase si basa su documenti prodotti dalle istituzioni dell'UE, come lo studio promosso e finanziato della Commissione (Bobbà, Carrara, Huisman, Mathieux, & Pavel, 2020) per delineare le tendenze future per i CRM o la comunicazione della (Commissione europea, 2020b) sulla resilienza dei CRM. Gli aggiornamenti delle diverse articolazioni della Commissione europea (DG GROW, 2023) sull'elenco dei CRM sono stati utili per definire questa indagine. Altri documenti di centri di ricerca e *think tank* si

concentrano sulla posizione geopolitica dell'UE sui CRM (Theodosopoulos, 2020). Il sistema di informazione sulle materie prime della banca dati EU Science HUB si è rivelato utile per il recupero dei dati sui CRM (Joint Research Centre, 2023). Tra gli studi iniziali, oltre a un rapporto dell'Organizzazione mondiale del commercio (2020), ci sono anche le informazioni messe a disposizione dall'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico – OCSE (2023) – che cercano di ricostruire le filiere legate ai CRM. Alcuni articoli sistematizzano queste informazioni, concentrandosi sulle restrizioni all'esportazione delle risorse naturali presenti negli accordi dell'OMC e sulla giurisprudenza pertinente dei panel dell'OMC (Marceau, 2016). Due briefing, redatti dal Servizio Ricerca del Parlamento europeo, sono stati importanti per delineare la struttura di questa ricerca. Il primo colloca i CRM nel contesto generale della ripresa dell'UE dopo la pandemia di SARS-CoV-2 (Szczepański, 2020), il secondo si concentra sul pilastro esterno della strategia CRM dell'UE (Szczepański, 2021).

Per avviare il recupero della letteratura, *Scopus* e *Web of Science* sono stati scelti come *database* bibliografici: come spiegato anche precedente sezione, si tratta di un archivio multidisciplinare di articoli scientifici più ampio e meno settoriale di altri, già utilizzato per condurre ricerche incrociate che consideravano contemporaneamente sia le città che altri argomenti scientifici (Sharifi & Khavarian-Garmsir, 2020).

Il 9 novembre 2022, la ricerca ha prodotto 190 risultati. La stringa di ricerca è composta da tre sezioni funzionali⁷. Le prime due comprendono gli elementi centrali della ricerca: CRM e città. In ogni sezione, i sinonimi sono collegati dall'operatore booleano 'OR' per ampliare lo spettro di ricerca. Invece, le due sezioni sono collegate dall'operatore 'AND' che restringe il campo di ricerca. A queste sezioni se ne aggiunge una terza: è composta da parole che appartengono al campo del riciclaggio. Questa sezione si basa su studi preliminari che

⁷ La stringa di ricerca è stata redatta come segue:

TITLE-ABS-KEY (("critical raw materials" OR "secondary raw materials" OR antimony OR hafnium OR phosphorus OR baryte OR "heavy rare earth elements" OR scandium OR beryllium OR "light rare earth elements" OR "silicon metal" OR bismuth OR indium OR tantalum OR borate OR magnesium OR tungsten OR cobalt OR "natural graphite" OR vanadium OR "coking coal" OR "natural rubber" OR bauxite OR fluor spar OR niobium OR lithium OR gallium OR "platinum group metals" OR titanium OR germanium OR "phosphate rock" OR strontium) AND (cities OR "urban areas" OR "urban centers" OR "metropolis" OR "towns" OR "metropolitan areas") AND ("urban mining" OR "urban mines" OR "e wastes" OR "recyclable waste" OR "waste processing" OR landfills OR recycle OR recycling)).

evidenziano che le politiche europee in materia di materie prime critiche, soprattutto i loro sono focalizzate sul recupero dei CRM⁸.

Sono stati applicati criteri di *screening* per perfezionare la ricerca. Data la sua prospettiva europea, si è deciso di limitare i risultati a quelli prodotti da ricercatori affiliati a istituzioni con sede nell'UE. Poiché l'attenzione verso i CRM è cresciuta progressivamente dal 2007 in poi, sono state selezionate solo le ricerche dal 2007 al 2022 (Szczepański, 2020). Infine, la ricerca ha considerato solo articoli scientifici, documenti di conferenze, recensioni e capitoli di libri scritti in inglese.

3.2.3 Sintesi dei risultati della revisione

Una revisione preliminare dei documenti è stata effettuata esaminando i loro abstract. In questo modo, è stato aggiunto un secondo discriminante geografico: sono state prese in considerazione solo le ricerche condotte all'interno dell'UE, con poche eccezioni. Alla fine di questo processo i restanti documenti erano 154, l'81,05% del totale. La maggior parte delle ricerche - 18 - sono state pubblicate nel 2020, 11,7% del totale, 16, il 10,39%, sono stati rilasciati nel 2018 e 14, il 9,09%, nel 2019. La Germania ha il maggior numero di studi, il 12,31% del totale. L'Olanda ha il 10,07% mentre l'Italia, terza, raggiunge l'8,21%. Infine, occorre sottolineare che solo il 17,69% delle pubblicazioni appartiene alle scienze sociali ed economiche mentre la stragrande maggioranza, l'82,31%, si colloca nel campo delle scienze matematiche, fisiche, naturali e dell'ingegneria.

I documenti sono stati divisi in tre sezioni in base al loro principale punto focale sui CRM. Le tre sezioni raccolgono ricerche che si concentrano rispettivamente sull'inquinamento causato dai CRM, sul loro riciclo e sulle nuove tecnologie per sfruttarle. Tuttavia, queste sezioni sono permeabili l'una all'altra e spesso uno studio potrebbe essere classificato in più sezioni.

⁸ La ricerca è stata condotta solo nei campi titolo, abstract e parole chiave utilizzando il codice di campo "TITLE-ABS-KEY". Le espressioni composte da due o più parole sono state ricercate inserendole tra virgolette doppie: ciò significa che sono stati inclusi plurali e varianti ortografiche. L'acronimo 'CRMs' viene utilizzato per riassumere anche altre espressioni. Per escludere ciascuno di questi risultati, l'operatore «E NON» avrebbe dovuto essere aggiunto prima di qualsiasi espressione diversa da «materie prime critiche». Alla fine, tale acronimo non è stato incluso tra i termini di ricerca.

3.2.3.1 I CRM come inquinanti

La prima sezione della revisione si concentra sugli studi sui CRM come inquinanti. In quest'area di ricerca, l'antimonio è stato utilizzato come proxy per le emissioni derivate dalle pastiglie dei freni e il vanadio per le emissioni derivate dall'olio combustibile fossile per sviluppare sistemi in grado di tracciare l'inquinamento del traffico (Dong, Ochoa Gonzalez, & Harrison, 2017). In un altro articolo, i metalli pesanti e il fosforo sono stati monitorati nel percolato prodotto dalle discariche municipali in Polonia per determinarne i livelli di inquinamento (Kulikowska & Klimiuk, 2008). Inoltre, il cobalto nei sedimenti di fondo delle acque reflue provenienti dagli impianti municipali di trattamento delle acque è stato determinato per definire i livelli di inquinamento in dodici diversi fiumi (Skorbiłowicz, 2007).

Antimonio, vanadio e cobalto sono stati raccolti vicino alle strade urbane per valutare l'inquinamento atmosferico all'interno delle città di Strasburgo e Kehl usando le cortecce degli alberi come bio-monitoratori (Guéguen, Stille, & Millet, 2011). Il vanadio è stato ritenuto responsabile, tra gli altri inquinanti, della tossicità riscontrata in frutta e verdura coltivate in aree contaminate del sud Italia a causa dello scarico illegale di rifiuti (Esposito, Nardone, & Fasano, 2018). Altri ricercatori hanno monitorato le concentrazioni di palladio, platino e rodio nella polvere del traffico nella città di Monaco per valutare i loro effetti tossicologici (Sievers & Schuster, 2015).

Un altro studio ha esplorato i flussi di fosforo all'interno degli ambienti urbani in una prospettiva a lungo termine presentando un modello globale per la quantificazione dei flussi di fosforo urbano da diverse fonti e la sua presenza nei rifiuti urbani (Morée, Beusen, & Bouwman, 2013). Una ricerca simile ha esaminato l'impatto a lungo termine delle attività industriali periurbane in Belgio che utilizzavano fosfati e altri composti contenenti CRM (Paridaens & Vanmarcke, 2008). Un'altra ricerca di questo tipo è stata eseguita in Polonia, vicino alla città di Stettino, per studiare la contaminazione del suolo nei siti metallurgici. Il cobalto era uno degli elementi più inquinanti presenti in questi suoli (Kupiec, Pieńkowski, & Bosiacka, 2019). Rimanendo in quest'area di ricerca, la concentrazione, la distribuzione spaziale e le fonti di titanio, vanadio e tungsteno in campioni di terreno provenienti da un'area mista industriale e residenziale nella parte meridionale della città di Sisak, in Croazia, sono stati determinati da un'indagine geochimica. I risultati mostrano che lo sviluppo industriale incontrollato ha lasciato un'eredità di grave contaminazione (Šorša, Miler, & Gosar, 2018).

Altri studiosi si sono concentrati sulle sfide emergenti dal crescente uso di nanomateriali le cui nanoparticelle possono essere rilasciate come percolato negli ambienti acquatici. Questo studio ha dimostrato che l'aumento dell'uso di questi materiali ha portato ad un aumento della concentrazione di titanio nelle acque reflue di Madrid (Jimenez-Relinque, Grande, & Duran, 2020). Un altro esperimento ha studiato le concentrazioni di cobalto nelle

piante provenienti dalle acque reflue municipali con lo scopo di far luce sulle potenziali implicazioni ambientali (Papaioannou, Koukoulakis, & Lambropoulou, 2019).

Inoltre, diversi studi si sono concentrati sulla composizione delle ceneri volanti provenienti da sei impianti di termovalorizzazione delle città. In totale, sessantuno elementi, tra cui elementi di terre rare, antimonio e bismuto, sono stati analizzati evidenziando come le ceneri volanti siano fonti inquinanti (Haberl, Koralewska, & Schlumberger, 2018). Una ricerca simile è stata realizzata nella città di Campdorà in Spagna, dove sono stati raccolti campioni di suolo e aria analizzando i livelli di antimonio, cobalto e vanadio vicino all'inceneritore di rifiuti solidi urbani per valutare possibili rischi per la salute (Rovira, Nadal, & Schuhmacher, 2018). Similmente, in Italia, un gruppo di ricercatori ha eseguito un'analisi ambientale sulla produzione di acciaio nella città di Taranto (Renzulli, Notarnicola, & Tassielli, 2016).

Un diverso tipo di studio si concentra sull'assorbimento fogliare di antimonio contenuto nel particolato originato dall'emissione di una fabbrica di riciclaggio delle batterie in un'area periurbana (Schreck, Foucault, & Sarret, 2012). Infine, i ricercatori hanno esaminato le concentrazioni di antimonio, cobalto e platino nelle urine di un particolare gruppo monitorato di residenti urbani esposti a emissioni di piante che nella loro attività metabolica assorbono anche CRM rivelando preoccupanti livelli di inquinamento (Chellini, Maurello, & Cortini, 2017).

3.2.3.2 Il riciclo dei CRM

Il secondo raggruppamento di ricerche, frutto della revisione, si basa su studi sul riciclo dei CRM. In questo campo, una ricerca ha valutato la fattibilità della costruzione di edifici utilizzando principalmente materie prime riciclate provenienti da miniere urbane: questo approccio ha avuto successo in termini di economia circolare e consumo di materiali (Mostert, Sameer, & Glanz, 2020). Una ricerca comparabile ha progettato un sistema in grado di determinare i flussi di materie prime, e le loro scorte, nelle aree urbane per identificare in anticipo le future fonti di materie prime secondarie (Heinrich & Lang, 2019).

Altri ricercatori hanno eseguito un caso di studio sullo sfruttamento delle risorse antropogeniche depositate nella rete metropolitana di Vienna per valutare il loro potenziale come materie prime secondarie (Lederer, Kleemann, & Ossberger, 2016). Un altro studio, condotto in Italia, si è concentrato sulle tecniche di riciclo per valutare la fattibilità del recupero delle batterie usate: i risultati mostrano che è possibile recuperare cobalto e litio dalle batterie esauste attraverso soluzioni di percolato (Vassura, Morselli, & Bernardi, 2009). In questo campo, i ricercatori hanno valutato le prestazioni di riciclaggio dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche per quanto riguarda i materiali recuperati da desktop e laptop (Van Eygen, De Meester, & Tran, 2016). Gli studiosi hanno sottolineato l'abbondanza di cobalto e altri CRM nei rifiuti dei circuiti stampati che, attraverso processi di triturazione,

scissione e digestione chimica, sono un'importante fonte di CRM nelle aree urbane (Touze, Guignot, & Hubau, 2020).

Spesso, attraverso i processi di maturazione, i rifiuti solidi urbani possono restituire una notevole quantità di CRM. In effetti, diversi studi propendono per il recupero di materiali di scarto piuttosto che la loro messa in discarica (Di Lonardo, Binner, & Lombardi, 2015). Anche il recupero dai sistemi di acque reflue è sempre più enfatizzato. Un documento ha valutato quanto bene la metodologia della valutazione del ciclo di vita (LCA), un metodo per valutare gli impatti ambientali di tutte le fasi di un prodotto o processo, è stata utilizzata negli ultimi anni. Questa ricerca ha evidenziato la necessità di migliorare la coerenza metodologica di questo tipo di studio per caratterizzare meglio le opportunità di recupero dei CRM dai sistemi di acque reflue (Lam, Zlatanović, & van der Hoek, 2020).

All'interno degli studi sui CRM che si concentrano sul loro riciclaggio, un posto particolare è occupato dalle ricerche sul fosforo. Il suo crescente utilizzo sia in ambito urbano che agricolo, oltre alla natura non rinnovabile delle sue fonti, rendono il fosforo una riserva strategica. In Svezia, ad esempio, l'attenzione su questo aspetto è molto forte. Uno studio ha mappato i flussi di fosforo utilizzando diversi scenari per Stoccolma. I risultati hanno indicato che il fosforo riciclato dalle acque reflue coprirebbe la maggior parte della domanda totale di fosforo di Stoccolma (Wu, Franzén, & Malmström, 2016).

Un'altra ricerca utilizza revisioni della letteratura, interviste alle parti interessate e altri approcci misti per sviluppare politiche europee comuni di riciclaggio del fosforo (Nedelciu, Ragnarsdóttir, & Stjernquist, 2019). In Svezia, gli studiosi si sono concentrati sul riciclaggio del fosforo dai residui degli inceneritori di rifiuti solidi urbani sostenendo che, attraverso l'estrazione dalle loro ceneri volanti, il recupero del fosforo potrebbe soddisfare il 30% della domanda annuale di questo elemento come fertilizzante (Kalmykova & Karlfeldt Fedje, 2013). Questo approccio sembra confermato da un altro studio, condotto a Göteborg: i suoi risultati evidenziano che i residui dell'incenerimento dei rifiuti solidi rappresentano una grande fonte sottovalutata di fosforo (Kalmykova et al., 2012).

Attraverso lo studio delle disposizioni igienico-sanitarie, un'altra ricerca ha stimato i flussi di fosforo dividendoli in riutilizzo redditizio e perdite dannose per l'idrosfera e le discariche (Neset et al., 2010). In Spagna, una ricerca ha studiato la relazione tra i sistemi di gestione dei rifiuti solidi urbani e il recupero del fosforo nella città di Vitoria-Gasteiz per fornire un punto di riferimento per le città europee di medie dimensioni (Zabaleta & Rodic, 2015). Inoltre, un altro studio ha valutato la fattibilità tecnica e ambientale dell'applicazione di una "struvite", un minerale composto da fosfato di ammonio idrato e magnesio, strategia di recupero per soddisfare il fabbisogno di fosforo per fertilizzare i campi agricoli della metropoli di Barcellona (Ruff-Salís et al., 2020).

Per quanto riguarda i Paesi Bassi, la presente ricerca bibliografica ha prodotto due studi simili. Il primo riguarda la valutazione della possibile corrispondenza tra l'offerta da parte dei sistemi igienico-sanitari e la domanda di fosforo da parte dell'agricoltura urbana, in termini di quantità e qualità, per favorire un metabolismo urbano circolare a Rotterdam

(Wielemaker, Weijma, & Zeeman 2018). Il secondo ha mappato i carichi di fosforo e gli hotspot sia a livello di edificio che di quartiere ad Amsterdam per attirare l'attenzione sulla necessità di analisi su scala multipla nel processo decisionale relativo alle strategie di riciclaggio (Wielemaker et al., 2020).

Altri ricercatori si sono concentrati sulla gestione sostenibile del fosforo nel sistema idrico-agroalimentare dell'area metropolitana di Parigi, suggerendo che una gestione ottimale di questa risorsa dovrebbe essere integrata all'interno di un approccio globale invece di essere suddivisa tra agricoltura, gestione dei rifiuti e sistemi igienico-sanitari (Esculier et al., 2019). Altri studiosi hanno studiato il riciclo del fosforo dai rifiuti urbani attraverso il cosiddetto "phyto-P-mining", un metodo basato sull'estrazione vegetale del fosforo dai materiali di scarto, utilizzato per produrre substrati per piantagioni (Nehls et al., 2015). Diverse ricerche hanno analizzato le prestazioni ambientali del riciclaggio del fosforo confrontandole con due fertilizzanti inorganici convenzionali: i risultati hanno mostrato che i fertilizzanti al fosforo riciclato sono competitivi rispetto a quelli convenzionali (Hörtenhuber, Theurl, & Möller, 2019). Infine, dopo aver identificato la frazione organica dei rifiuti solidi urbani come risorsa alternativa al fosforo, alcuni ricercatori si sono concentrati sulla carbonizzazione idrotermale, una tecnica per recuperare il fosforo dai rifiuti urbani e utilizzarlo nell'agricoltura urbana e nell'orticoltura come fertilizzante (Oliver-Tomas et al., 2019).

3.2.3.3 Nuove tecnologie e CRM

La terza sezione della rassegna della letteratura riguarda le nuove tecnologie applicate ai CRM. In questo campo, uno studio ha sviluppato un nuovo approccio per fornire un inventario completo degli alberi della città, utilizzando una combinazione di "Light Detection and Ranging", una tecnica di telerilevamento pulsato laser e osservazione sul campo valutando al contempo lo stoccaggio complessivo delle emissioni urbane che spesso contengono CRM in veste di inquinanti polverizzati (Speak et al., 2020). Un'altra ricerca ha esaminato la massima capacità di assorbimento del fosforo di due fanghi di allume disidratati, sottoprodotti della depurazione dell'acqua, campionati da due impianti di trattamento delle acque a Dublino per valutare l'uso di fanghi di allume come assorbente a basso consumo di fosforo (Zhao & Yang 2010). Un altro articolo si è concentrato sull'utilizzo di scorie metallurgiche con presenza di silicato di magnesio e alluminio come assorbente composito per il trattamento delle acque reflue contaminate da cerio (Morozova et al., 2020).

Altri ricercatori hanno studiato la riduzione fotocatalitica del vanadio sul biossido di titanio in soluzione acquosa: questo è stato applicato alle acque reflue urbane contaminate, combinando bonifica e recupero del vanadio (Sturini et al., 2013). In Italia, gli studiosi dell'Università di Cagliari hanno sviluppato una nuova tecnologia basata sull'uso di getti d'acqua ad alta velocità per ottenere una completa disintegrazione della gomma dagli pneumatici, lasciando un prodotto in acciaio molto pulito: la gomma così ottenuta può essere utilizzata

sia per la filtrazione dell'acqua comunale che per la fabbricazione di elementi da costruzione (Ciccu & Costa, 2011). Sempre a proposito di sistemi per il trattamento dei rifiuti, uno studio ha esplorato la possibilità di un trattamento innovativo dei rifiuti solidi urbani: consiste in un processo in tre fasi che combina l'incenerimento dei rifiuti, il lavaggio a umido e il trattamento a umido delle ceneri risultanti. I prodotti di questo processo possono quindi essere riciclati come materie prime di alta qualità (Vandecasteele et al., 2007).

Altri ricercatori si sono concentrati su una metodologia combinata per migliorare l'efficienza della raccolta dei rifiuti elettronici, ricchi di CRM: è stato sviluppato un sistema di supporto alla raccolta dei rifiuti elettronici online, con un algoritmo di ricerca armonizzato, per l'ottimizzazione del percorso dei veicoli di raccolta dei rifiuti nei centri urbani (Nowakowski, Szwarc, & Boryczka, 2020). Un altro articolo mostra come le nuove tecniche di precipitazione del fosfato di magnesio ammonio possano rimuovere l'ammoniaca dal percolato delle discariche municipali: il composto risultante potrebbe essere utilizzato come fertilizzante grazie alla sua bassissima concentrazione di metalli pesanti (Di Iaconi et al., 2010). Inoltre, diversi ricercatori hanno esplorato nuovi metodi per isolare un radionuclide di elementi di un CRM, lo stronzio-90, da soluzioni acquose per determinare la qualità ambientale e la sicurezza delle radiazioni (Galanda et al. 2009).

Altre ricerche hanno esaminato la fattibilità del recupero di CRM da circuiti stampati e magneti permanenti contenuti nei dischi rigidi utilizzando operazioni non distruttive, concludendo che questo processo sarebbe economicamente redditizio (Talens Peiró, Castro Girón, & Gabarrell i Durany, 2020). Infine, in uno studio simile, i ricercatori hanno applicato la lisciviazione a corrente incrociata per mobilitare l'indio dai componenti del display a cristalli liquidi a fine vita, scoprendo che questa procedura era vantaggiosa da un punto di vista economico e ambientale (Rocchetti et al., 2015).

3.2.4 Conclusioni

Da quanto scritto, i CRM svolgono un ruolo cruciale, sia direttamente che indirettamente, nel *Green Deal* e nei piani di ripresa dell'UE. Infatti, data la loro pervasività nei processi di produzione e riciclaggio, la ripresa europea non potrà prosperare senza di essi. La revisione della letteratura ha evidenziato che i tre nuclei tematici - inquinanti, riciclaggio e nuove tecnologie - sono inestricabilmente legati, influenzandosi a vicenda. Questi tre aspetti fanno tutti parte dei nuovi paradigmi europei sull'economia circolare sia a livello nazionale che urbano. Fondamentalmente, si può ragionevolmente sostenere che lo sviluppo delle città e la loro rigenerazione dipenderanno sempre più da materie prime critiche. Di fatto, la narrazione sviluppata - anche inconsciamente - a livello scientifico pone la città come pivot essenziale dei piani strategici dell'UE sui CRM.

Sulla base dei risultati ottenuti dalla revisione, è ragionevole affermare che, sempre più spesso, la narrazione legata ai CRM e ai loro impieghi dovrà necessariamente porre come

elemento centrale il ruolo degli agglomerati urbani. Di fatto, in Europa l'accento posto sull'economia circolare produrrà una narrazione fortemente imperniata sulle potenzialità - e sui pericoli - che derivano dai CRM a tutti livelli scientifici e di governo.

3.3 Le terre rare e la loro importanza geopolitico-economica

3.3.1 Introduzione

In questa sezione si passerà un gruppo particolare di materie prime critiche e strategiche che le proprie caratteristiche e importanza merita una trattazione più particolareggiata. Le terre rare – Rare Earth Elements, REEs – comprendono 17 elementi, la maggior parte dei quali appartiene al gruppo dei lantanidi o lantanoidi – lantanio, cerio, praseodimio, neodimio, promezio, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, olmio, erbio, tulio, itterbio e lutezio – a cui si aggiungono l'ittrio e lo scandio che hanno proprietà chimiche e fisiche molto simili agli altri (Chapman, 2018). Questi elementi sono in genere suddivisi in due ulteriori raggruppamenti in base al valore crescente dei numeri atomici: le *Light REEs* (LREEs) – dal lantanio (57) al gadolinio (64) –, e le *Heavy REEs* (HREEs) – dal terbio (65) al lutezio (71), con aggiunta dell'ittrio⁹. Una suddivisione alternativa prevede tre gruppi: le *Light REEs* (dal lantanio al promezio), le *Medium REEs* (dal samario al gadolinio) e le *heavy REEs* (dal terbio al lutezio, oltre a ittrio e scandio). Tutti gli elementi delle terre rare sono compresi fra le materie prime critiche – *critical raw materials*, CRM –, individuate dall'Unione europea, e sei elementi rari – cerio, neodimio, praseodimio, samario, terbio e gadolinio – fanno anche parte delle materie prime strategiche – *strategic raw materials*, SRM – ovvero il gruppo di risorse più preziose per l'autonomia strategica europea e per la sua doppia transizione verde e digitale. Queste precisazioni sono dovute in quanto, non di rado, si tendono a confondere fra terre rare, materie prime critiche e materie prime strategiche oppure le si ritiene sinonimi *tout court*.

Gli elementi che costituiscono le terre rare iniziarono a ritagliarsi un'attenzione specifica fin dalla loro scoperta. Nel 1787, il chimico Carl Axel Arrhenius scoprì un minerale nero, l'ytterbite, in Svezia, in una cava vicina al villaggio di Ytterby. Nel 1794 il finlandese Johan Gadolin isolò da quel minerale un ossido impuro che venne chiamato ittrio; nel 1803

⁹ In questa suddivisione, lo scandio non è incluso in nessuna delle due categorie.

venne ottenuto un ossido bianco, il cerio, da un altro minerale trovato in Svezia. Ricerche e studi approfonditi, che durarono per i successivi trent'anni, riuscirono infine a definire la composizione effettiva di quei primi due composti: l'operazione era stata resa estremamente complessa dall'estrema difficoltà nei processi di separazione degli elementi. Dal 1839 in poi, grazie agli sviluppi scientifici e tecnologici, e fino ai primi anni del Novecento si procedette alla scoperta e alla separazione di tutti gli altri elementi delle terre rare (Gschneidner, Capellen, & Tecotzky, 1987).

L'appellativo raro può risultare fuorviante se lo si intende legato alla loro abbondanza sul pianeta. Questi composti, infatti, sono ampiamente diffusi in tutto il globo – alcuni in quantità maggiore rispetto a oro, argento e platino, altri anche del piombo e del rame. Tuttavia, la loro estrazione risulta essere particolarmente difficile e costosa: nei depositi raggiungibili vengono generalmente estratti come sottoprodotti di altri elementi – come ferro o fosforo; la loro concentrazione è di norma bassissima – non più del 5% del materiale estratto; generalmente si trovano associati con altri materiali radioattivi o comunque fortemente inquinanti (Klinger, 2018). Come si vedrà nel corso dell'articolo, un altro elemento di criticità di natura geopolitica, è l'elevata concentrazione dei giacimenti conosciuti in Cina.

L'importanza delle terre rare è cresciuta in maniera esponenziale nel corso dello scorso secolo, in quanto le loro caratteristiche magnetiche ed elettrochimiche, la loro capacità di potenziamento delle leghe metalliche, la luminescenza e l'elevata efficacia sono ormai necessarie per quasi ogni branca dell'industria high-tech – dai motori dei veicoli elettrici e ibridi, all'elettronica, passando dall'eolico ai velivoli ad alte prestazioni, fino alle ricerche avanzate per le applicazioni militari.

3.3.2 La letteratura sulle terre rare

Nonostante possano apparire confinate al campo chimico-fisico dell'indagine scientifica, le terre rare sono l'oggetto di una letteratura copiosa e ramificata. Sebbene gli articoli di natura chimico-fisica pubblicati su riviste altamente specializzate rivestano un ruolo importante, la ricognizione della letteratura, che verrà di seguito illustrata, ha consentito di enucleare quattro gruppi di ricerche utili ai fini di questo studio.

Il primo ha diversi punti di contatto con i contributi di natura chimico-fisica e geologica richiamati poco sopra: si tratta, in sostanza, di contributi che spaziano dalla storia naturale di queste risorse alla sostenibilità ambientale del loro impiego. Si inseriscono a pieno titolo in questa categoria i lavori che si occupano di ripercorrere la storia e gli eventi salienti legati allo sfruttamento delle terre rare (Gschneidner, Capellen, & Tecotzky, 1987). Altre ricerche si occupano di mappare geologicamente le risorse, i depositi in singoli stati o gruppi di stati (Van Gosen et al., 2014). In altri casi, si è di fronte ad articoli che passano in rassegna gli sviluppi più recenti legati all'estrazione e alla lavorazione degli elementi rari esaminando anche le principali sfide geopolitiche legate alla loro commercializzazione (Ganguli & Cook, 2018).

Altri lavori, sempre appartenenti a questa prima categoria, si occupano di analizzare le applicazioni tecnologiche e le ricadute ambientali legate all'utilizzo di queste commodity. In questi casi, l'interesse è focalizzato intorno al potenziale tecnologico di tali elementi (USGS, 2002). Alcune ricerche, condotte con un approccio interdisciplinare, esaminano le attività minerarie, lo sviluppo di prodotti ad alta tecnologia nonché le opportunità e le sfide relative al riciclaggio di questi elementi: presentano tecniche, approcci, processi e tecnologie recenti in grado di ridurre i costi finanziari e ambientali (Kennedy, 2015).

Indagini di diverso tipo tendono, invece, ad esaminare la relazione tra complessi industriali e la società, ampiamente definita, coniugando le ricerche nel campo delle scienze sociali con i problemi legati allo sviluppo e alla sostenibilità dello sfruttamento delle terre rare (Klinger, 2018). Altri studi si concentrano sull'analisi della domanda di elementi rari confrontandola con le capacità di saggiare e sfruttare nuovi depositi (Long et al., 2012).

Altri contributi scientifici tendono a restringere geograficamente la propria analisi analizzando le catene di approvvigionamento cinesi alla luce delle quote minerarie, delle quote di esportazione e delle tasse sulle risorse istituite dal governo di Pechino. Vengono utilizzate simulazioni che elaborano tre scenari con diverse quote di produzione – alte, medie e basse – confrontandole con i tassi di crescita costanti della domanda dal 2015 al 2030: i risultati mostrano che a livello globale vi saranno carenze più o meno gravi di tali *commodity* (Nguyen & Imholte 2016).

Altri articoli si concentrano, invece, su quelli che ritengono essere i fattori chiave che determinano i livelli di fornitura dei metalli rari: i costi di estrazione e raffinazione, i colli di bottiglia nelle filiere di distribuzione nonché l'inquinamento ambientale connesso a queste

attività. Vengono messe in risalto le potenzialità dell'estrazione di tali elementi da materiali di scarto e rifiuti: processi attraverso i quali sarebbe possibile minimizzare i rifiuti nocivi generati dalla loro lavorazione (Okabe, 2017).

Inoltre, diverse ricerche si concentrano su particolari composti minerali analizzando in che modo il governo e le strutture di ricerca di Pechino abbiano stabilito uno standard affrontando in modo attivo la gestione di queste risorse e prendendo in considerazione i recenti progressi nella lavorazione ecocompatibile delle terre rare: tali progressi hanno contribuito a delineare i futuri sviluppi tecnici di questo settore (Wang et al., 2017).

Il secondo gruppo di ricerche riguarda le implicazioni economiche della produzione e della commercializzazione delle terre rare. In questo genere di lavori si analizza l'andamento dei prezzi degli elementi rari al fine scoprire tendenze stabili nel medio e nel lungo periodo. Spesso vengono presi in considerazione anche i progetti di sfruttamento allo scopo di inquadrare correttamente le dimensioni dell'industria e il volume d'affari che ruota attorno alle terre rare nonché facilitare lo sviluppo di valutazioni economiche che possano interessare futuri progetti estrattivi. In genere, tenuto conto della complessità della produzione delle terre rare, tale mercato non presenta particolarità difficoltà rispetto ad altre attività estrattive. Ciò che desta realmente l'interesse, e le preoccupazioni, degli autori è l'alta volatilità dei prezzi, spesso legata alla posizione di quasi monopolio conquistata dalla Cina negli ultimi decenni, la quale risulta essere il tallone d'Achille di qualsiasi analisi sul mercato e sugli investimenti legati all'estrazione e alla commercializzazione delle terre rare (Riesgo García et al., 2017).

Altri studi si sono interessati delle dinamiche di mercato a breve termine, così come dei fattori di crescita del settore e delle sue restrizioni. Alcuni fra questi lavori utilizzano il modello delle cinque forze di Porter. Queste includono: intensità della concorrenza tra aziende nello stesso settore, potere contrattuale dei fornitori, potere contrattuale dei clienti, minaccia di potenziali nuovi concorrenti nel settore, minaccia di prodotti sostitutivi nonché i profili dettagliati dei principali attori del settore (Transparency Market Research, 2022).

Documenti imprescindibili per conoscere le dinamiche economiche legate al mercato delle terre rare sono quelli prodotti dall'Organizzazione Mondiale del Commercio. Di fatto, il 13 marzo 2012, gli Stati Uniti, insieme ad Unione Europea e Giappone, richiesero consultazioni in merito alle restrizioni cinesi all'esportazione di vari composti di terre rare, tungsteno e molibdeno. La richiesta si riferisce a una serie di misure cinesi che, operando separatamente

o collettivamente, imponevano limiti all'esportazione degli elementi rari. Tali restrizioni includevano dazi all'esportazione, quote di esportazione, requisiti minimi di prezzo all'esportazione, requisiti di licenza di esportazione. I documenti prodotti dall'Organizzazione rivestono un valore storico e scientifico di prim'ordine sia per i dati che contengono sia perché si tratta del primo e principale scontro internazionale, di carattere legale ed economico, legato alle terre rare (World Trade Organization, 2017).

Il terzo gruppo di studi collegati alle terre rare ha natura geopolitica e strategica: prende in considerazione lo scenario globale. Alcune ricerche, partendo dalla posizione di predominio raggiunta da Pechino, analizzano l'atteggiamento di altre nazioni in cui si trovano estesi depositi di composti rari. Questo tipo di lavori contengono spesso "scenarizzazioni" che formulano ipotesi sulla costituzione di cartelli di stati produttori di terre rare oppure su quali potrebbero essere le contromosse di altre nazioni per non lasciare che due o più paesi assumano il controllo assoluto di queste risorse (Giannuli, 2014).

Alcuni studi pongono, invece, la loro attenzione sulle ricadute dell'impennata dei prezzi delle terre rare. Si è osservato che prezzi più alti hanno avviato una serie di attività di ricerca, condotte da aziende hi-tech, laboratori governativi e università. Ad esempio, i lavori dei geologi in questo campo si sono concentrati sul miglioramento delle tecniche di prospezione e di sondaggio per appurare se in determinate miniere vi possano essere composti di elementi rari; gli ingegneri di processo hanno condotto ricerche che stanno rendendo più efficiente la produzione primaria e il riciclaggio; gli ingegneri dei materiali hanno cercato validi sostituti che richiedessero una quantità inferiore o nulla di terre rare offrendo al contempo proprietà comparabili o superiori a quelle dei materiali esistenti. Le conclusioni di questo genere di lavori tendono a sottolineare che, anche se le catene di approvvigionamento globali non sono significativamente diverse rispetto all'inizio dello scorso decennio, le innovazioni spinte da nuove turbolenze di mercato hanno conseguenze di vasta portata e non completamente prevedibili (Eggert et al., 2016).

Vi sono, inoltre, dei documenti che esaminano le distorsioni del mercato delle terre rare con un approccio sistemico. Partendo dalle restrizioni all'esportazione varate dal governo cinese tra il 2009 e il 2010, le criticità nello sfruttamento e nella commercializzazione delle terre rare vengono identificate al fine di esporre le loro interconnessioni economiche e politiche. Gli studi evidenziano che vi sono alcuni persistenti problemi che si amplificano a

vicenda: modelli politico-economici in competizione, nazionalismo delle risorse, opacità del mercato, mancanza di fiducia, cooperazione debole e la differenza tra approcci a breve termine contro modelli a lungo termine (Klossek, Kullik, & van den Boogaart, 2016).

Ulteriori ricerche hanno posto la loro attenzione sul dibattito relativo alla sicurezza degli approvvigionamenti di terre rare per determinati paesi. Si è constatato che, sebbene domanda e offerta siano quasi equivalenti nel complesso, l'offerta di particolari elementi – come il neodimio e il disprosio – risulta insufficiente. Ciò potrebbe tradursi in una forte instabilità dei prezzi e avere effetti negativi sull'integrazione e lo sviluppo di nuove tecnologie, soprattutto quelle verdi (Ungaro, 2013).

Ricerche di diverso indirizzo riflettono sulle politiche volte a rafforzare le restrizioni sulle esportazioni delle terre rare da parte della Cina in ottica sistemica. Viene sostenuto che le politiche di esportazione di Pechino relative agli elementi rari non dovrebbero essere considerate azioni a sé stanti. In generale, i controlli sulle esportazioni sono integrati in una trasformazione dei settori strategici. Il governo cinese promuove un'ampia gamma di politiche, tra cui la riorganizzazione produttiva, la conservazione delle risorse e la protezione dell'ambiente. I risultati di queste ricerche indicano che la narrativa geopolitica, che vede le risorse naturali come strumenti di politica del potere, può essere attribuita solo in parte alle politiche relative agli elementi rari. I principali motivi trainanti sono le preoccupazioni interne di Pechino per la conservazione delle risorse e la protezione ambientale, nonché lo sviluppo di industrie nazionali competitive (Wübbeke, 2013).

Alcune ricerche si sono concentrate sul grado di efficacia delle politiche restrittive messe in atto da Pechino. Utilizzando l'indice di Lerner, alcuni ricercatori hanno posto in evidenza che il potere di mercato degli ossidi di terre rare prodotte in Cina è aumentato notevolmente. Si giunge così alla conclusione che le politiche commerciali cinesi hanno esercitato effetti significativi e che le differenze del potere di mercato dimostrano la validità delle politiche di restrizione all'esportazione attuate da Pechino. Inoltre, si prevede che il governo cinese potrebbe spostare la sua attenzione dal controllo delle esportazioni al controllo della produzione realizzando, tramite guida statale, fusioni di imprese del settore per formare grandi cartelli di produttori (Zhang et al., 2015).

La quarta, e ultima, categoria di ricerche correlata alle terre rare è di tipo strategico: l'oggetto di studio è il confronto geopolitico che avviene tra Stati Uniti e Cina sulle terre rare.

La scelta di trattare questi studi come una categoria a sé non deve sorprendere: gli USA, che fino alla metà degli anni Ottanta dello scorso secolo erano i principali produttori di questi composti, dopo un primo periodo di accondiscendenza verso il nuovo predominio cinese, hanno iniziato a introdurre una serie di contromisure volte a contenere la crescente dipendenza dall'export di Pechino. Questa postura non ha prodotto solo provvedimenti legislativi o nuove tecnologie ma anche una copiosa produzione intellettuale.

In questo ambito, alcune ricerche presentano una valutazione dei potenziali scenari relativi alla domanda di terre rare, con particolare attenzione alle proiezioni per il futuro. Gli scenari analizzati identificano alcune variabili chiave che potrebbero influenzare in un prossimo futuro il mercato delle terre rare. In questo tipo di articoli, si sottolinea come l'utilizzo sempre maggiore dell'energia eolica e dei veicoli elettrici potrebbe essere un elemento fondamentale per l'andamento di tale mercato poiché le tecnologie attuali per i veicoli elettrici e le turbine eoliche dipendono fortemente dal disprosio (Dy) e dal neodimio (Nd), elementi rari ampiamente utilizzati nei magneti di questi dispositivi. Ciò potrebbe comportare aumenti considerevoli e sproporzionati della domanda di questi due elementi gravando in maniera sostanziale sulle importazioni statunitensi e avvantaggiando economicamente sia il governo di Pechino sia le industrie verdi cinesi che godrebbero di indubbi vantaggi competitivi grazie all'accesso a questi composti a prezzi inferiori rispetto a qualsiasi altro soggetto. Si sono sviluppate, quindi, proiezioni di utilizzo con scenari ad alto e basso consumo degli elementi rari in modo da valutare il loro futuro stato di disponibilità. I risultati mostrano che, in assenza di riutilizzo e riciclaggio efficienti, o dello sviluppo di tecnologie che utilizzano quantità inferiori di Dy e Nd, seguire un percorso coerente con la stabilizzazione e la riduzione della CO₂ atmosferica potrebbe portare a un aumento di oltre il 700% e 2600% rispettivamente per Nd e Dy nei prossimi 25 anni (Alonso et al., 2012).

Vi sono, inoltre, studi che analizzano in che modo la rinnovata attività di ricerca di giacimenti di composti appartenenti alle terre rare all'interno degli Stati Uniti, ad esempio in Alaska, possa essere utilizzata per sostituire le importazioni di questi composti dalla Cina. Di fatto, questi lavori, dopo aver illustrato le mappature geologiche dei territori interessati, si spingono a prevedere che, a causa della limitata offerta in combinazione al loro crescente uso nella produzione di energia verde così come nell'elettronica sia civile che militare – illuminazione, trasporti, applicazioni tecnologiche –, alcuni fra gli elementi che appartengono alle terre

rare già risultano di scarsa reperibilità. Viene spesso sottolineata una crescente preoccupazione per la disponibilità negli USA soprattutto per alcuni di questi elementi ovvero: neodimio, europio, terbio, disprosio e ittrio, molti appartenenti al gruppo delle terre rare pesanti (Barker & Van Gosen, 2012).

Altri documenti, infine, si concentrano sull'importanza per l'industria militare statunitense degli elementi rari che sono componenti critici dei moderni sistemi d'armamento come i sistemi di guida laser, i satelliti, i sottomarini da attacco rapido classe Virginia, i cacciatorpediniere classe Aegis, i caccia F-35 e le munizioni guidate di precisione. Si constata che gli Stati Uniti, sebbene dispongano di alcune riserve di terre rare, dipendono fortemente dai rifornimenti provenienti da altri paesi come Afghanistan, Bolivia e, soprattutto, Cina. La perdita dell'accesso a queste risorse avrebbe implicazioni economiche, militari e politiche avverse significative per gli Stati Uniti e i suoi alleati. Al contempo questo genere di ricerche esamina l'importanza strategica di queste risorse e la politica degli Stati Uniti nei confronti di questi composti. Si dà conto di come diverse agenzie governative statunitensi sono coinvolte nell'elaborazione di politiche e strategie volte alla minimizzazione dei rischi derivanti dalla scarsità delle terre rare (Chapman, 2018).

3.3.3 L'influenza delle terre rare sul mercato globale

L'aspetto economico-finanziario della competizione sulle terre rare è caratterizzato da un intreccio tra logica di mercato ed elementi geopolitici che, soprattutto a partire dal biennio 2009-2010, hanno fatto registrare un'intrinseca imprevedibilità nell'andamento di queste materie prime. A ciò bisogna aggiungere che un ruolo rilevante nelle dinamiche dei prezzi e nella fortuna dei progetti d'investimento delle imprese del settore è stato giocato dalla speculazione finanziaria che nell'ultimo decennio ha fatto registrare sia vertiginosi aumenti del prezzo di questi elementi rari, così come delle azioni delle aziende che si occupano della loro estrazione e raffinazione, sia repentini crolli delle attività coinvolte a vario titolo nel mercato delle terre rare.

Le terre rare sono elementi indispensabili per la moderna produzione di veicoli elettrici, per lo sfruttamento dell'energia verde e per l'elettronica. Ciò si riflette nel tasso di crescita annuo composto del 13,7% che, già nel 2017, era atteso fino al 2021 per il mercato globale

delle terre rare (Wealth Daily, 2017). Se si considera soltanto il mercato essenziale delle terre rare – ossia la loro produzione, raffinazione e commercializzazione –, esso appare in realtà di modeste dimensioni: ci si attesta sui 9 miliardi di dollari annui e un consumo globale di circa 150 mila tonnellate di ossidi di terre rare – i composti in cui è più facile trovare gli elementi che costituiscono le terre rare (Ganguli & Cook, 2018). Tuttavia, nonostante le dimensioni del mercato essenziale delle terre rare siano abbastanza contenute, ciò che le fa assurgere ad una posizione di primaria importanza nel mercato globale è il fatto che esse sono alla base della produzione di beni il cui valore si aggira attorno ai 7 trilioni – settemila miliardi – di dollari (Kennedy, 2015). Se questo dato si compara ai 101,33 trilioni del prodotto interno lordo globale (World Bank, 2023), si comprende come le terre rare siano elementi indispensabili per prodotti che rappresentano quasi il 7% del PIL mondiale. A questo si deve aggiungere che tali elementi rari sono impiegati spesso nei settori più tecnologicamente avanzati dell'economia mondiale, ovvero quelli che mostrano più potenzialità di crescita e che sembrano essere essenziali per una prossima rivoluzione tecnologica verde. Prima di affrontare gli aspetti finanziari relativi al mercato delle terre rare, occorre fornire un quadro ben preciso delle dinamiche di mercato relative a queste risorse.

La produzione di terre rare è andata via via crescendo, a ritmi sempre maggiori, a partire dagli anni Cinquanta del XX secolo (USGS, 2002). Gli Stati Uniti hanno detenuto il titolo di maggior produttore di terre rare dal 1965 fino alla metà degli anni Ottanta (USGS, 2002) quando, sulla base di una precisa strategia delineata da Deng Xiaoping, la Cina ha iniziato a sfruttare sistematicamente le sue estese riserve di elementi rari: nel 2022 si stima che la Cina ne abbia prodotto circa 210 mila tonnellate (USGS, 2023). Gli Stati Uniti, invece, negli ultimi decenni hanno più volte visto scemare, se non proprio svanire, la propria produzione domestica di terre rare. Il primo stop si verificò nel 2002 quando, a causa di timori legati all'inquinamento, venne decretata la fine delle attività estrattive di questi elementi. Il secondo, invece, dopo la riapertura di alcune miniere nel 2012, c'è stato nel 2015 quando, a causa della caduta dei prezzi di queste *commodity*, fu chiusa la miniera di Mountain Pass, l'unico grande deposito conosciuto di terre rare su suolo statunitense. In quell'anno la produzione USA si aggirava fra le 5400 e 5900 tonnellate (Long et al., 2012). Non essendo più un produttore, nel 2016 e nel 2017 – così come in altri periodi recenti – gli Stati Uniti sono stati dipendenti in toto dalle importazioni di terre rare mentre nel 2015 lo erano per il 65%.

Questa situazione preoccupava non poco l'*establishment* statunitense. Le contromisure sono state approntate alla fine del 2017. Il 20 dicembre di quell'anno è stato emanato l'ordine esecutivo n. 13817 che, servendosi anche del *Defence Production Act* del 1950, delineava una strategia federale per garantire forniture sicure e affidabili di minerali critici (U. S. Presidential Documents, 2017).

Nel corso del 2018 il Dipartimento dell'Interno, dando seguito all'ordine esecutivo, ha rilasciato una lista di venticinque elementi, composti, o gruppi di composti ritenuti strategici per gli Stati Uniti. Le *commodity* che rientrano in tale lista vengono qualificate come “minerali critici” perché ciascuno di essi è stato identificato come essenziale per la sicurezza economica e nazionale degli Stati Uniti, avendo catene di approvvigionamento vulnerabili ed essendo indispensabili nella fabbricazione di uno o più prodotti, la cui assenza avrebbe conseguenze significative per l'economia o la sicurezza nazionale (U. S. Department of the Interior, 2018). Le terre rare rientrano appieno nella lista già menzionata: ciò viene considerato un primo passo verso le forniture sicure e affidabili di terre rare e altri minerali critici e ha aperto la strada ai finanziamenti federali per consentirne la produzione negli Stati Uniti.

Queste decisioni hanno avuto un impatto immediato sulla produzione domestica di terre rare negli USA. Già nel 2018 la produzione mineraria di composti di elementi rari si attestava intorno alle diciottomila tonnellate con un aumento del 205% rispetto al 2015; nel 2019 si raggiungevano le ventiseimila tonnellate con un incremento del 44% sull'anno precedente (USGS, 2020). Quantità ancora ben lontane dai livelli produttivi di Pechino ma sufficienti per iniziare una graduale diminuzione della dipendenza degli Stati Uniti dalla produzione estera. A riprova dell'importanza degli elementi rari per Washington, il 22 luglio 2019 la Presidenza ha stilato un memorandum indirizzato al Dipartimento della Difesa in cui si afferma che la capacità di produzione interna di metalli e leghe di terre rare è essenziale per la difesa nazionale (Executive Office of the President, 2019).

A livello globale la situazione non sembra variare significativamente: tra il 2012 e il 2015 quasi il 72% dei composti contenenti terre rare è stato importato dalla Cina. I maggiori importatori, oltre agli USA, sono stati Estonia, Francia e Giappone con quote d'importazione che per ognuno di essi oscillano fra il 5 e il 7% della produzione totale di elementi rari.

Come si è accennato, la Cina è il più grande produttore di terre rare al mondo: circa l'80% della produzione mondiale è localizzata in quel paese. Tuttavia, ottenere dei dati

affidabili sulla produzione di elementi rari in Cina si rivela il più delle volte molto difficile. Ciò è dovuto anche al fatto che non risulta affatto chiaro se le statistiche ufficiali cinesi tengano conto della produzione illegale e clandestina di questi elementi che avviene all'interno del paese (Wang et al., 2017). Alcuni studi, però, indicano che la produzione illegale di terre rare in Cina raggiunge dimensioni decisamente ragguardevoli: circa il 60% degli ossidi di terre rare prodotti in Cina sarebbe illegale (Nguyen & Imholte, 2016). Prendendo in considerazione gli anni che vanno dal 2010 al 2015, la produzione illegale di ossidi di terre rare si è attestata tra le 25 e le 50 tonnellate (Eggert et al., 2016). A questo proposito, bisogna far presente che i produttori ufficiali cinesi di terre rare considerano le attività illegali in questo settore come una minaccia mortale a causa degli effetti incontrollati che queste hanno sulle dinamiche dei prezzi. Questo non è vero soltanto all'interno della Cina: le produzioni illegali, le quali spesso seguono rotte che attraversano il Vietnam o passano per Hong Kong, hanno ripercussioni sui prezzi di queste materie prime in tutto il mondo (Jamasmie, 2016). Per contrastare queste dinamiche, le autorità di Pechino e l'azienda australiana *Lynas* si sono impegnate per progettare e rendere operativo un sistema per la tracciabilità di questi prodotti minerari (Paul & Stanway, 2016).

Oltre alla Cina – e agli Stati Uniti in passato – gli altri paesi che nel 2022 hanno una produzione sensibile di terre rare sono l'Australia – diciottomila tonnellate –, la Birmania – dodicimila tonnellate –, la Thailandia – settemila cento tonnellate –, il Vietnam – quattromila trecento tonnellate –, l'India – quasi tremila tonnellate –, la Russia – duemilaseicento tonnellate –, il Madagascar – novecento sessanta tonnellate – e il Brasile – ottanta tonnellate (USGS, 2023). Tuttavia, bisogna constatare che non sempre i paesi ai primi posti per produzione sono anche quelli con le maggiori riserve di terre rare. La Cina risulta essere sia il primo produttore che il paese con le riserve più estese – che si stima ammontino a quarantaquattro milioni di tonnellate –, mentre le altre nazioni più ricche di terre rare sono Vietnam, con ventidue milioni di tonnellate, Brasile e Russia, con ventuno milioni; invece, si stima che gli Stati Uniti si fermino a circa due milioni e trecentomila tonnellate (USGS, 2023). C'è da aggiungere che la Russia, benché sconti ancora una certa arretratezza tecnologica che non la favorisce in questo settore, è uno dei pochi paesi che dispone di tutti i diciassette elementi che costituiscono le terre rare: sono stati anche scoperti nuovi giacimenti nella regione di Murmansk e nella penisola di Kola (Ungaro, 2013). Fin dalla metà del precedente decennio si stanno sviluppando,

non senza difficoltà, nuovi progetti di sfruttamento, come quello promosso dalla *joint venture* fra il gruppo *Ist* e la società statale *Rostek* che hanno stanziato circa un miliardo di dollari per estrarre terre rare nello stato siberiano della Jacuzia: i giacimenti in quest'area potrebbero arrivare a fornire complessivamente circa 154 milioni di tonnellate di minerali in cui sono presenti elementi rari (Mackenzie, 2014).

Bisogna aggiungere che la Cina non è soltanto il maggior produttore a livello mondiale di terre rare ma ne è anche uno dei maggiori utilizzatori poiché tali elementi sono fondamentali per la produzione di determinati prodotti *high tech* destinati sia all'export sia al mercato interno cinese. Nel 2011 quasi il 70% della produzione cinese di terre rare veniva impiegata nel paese (Wübbeke, 2013). A livello generale, tenuto conto anche della produzione degli altri paesi, è stato stimato che la Cina utilizza per la produzione di beni di diversa natura circa il 60% della produzione mondiale di terre rare (Transparency Market Research, 2022). Fra gli altri principali consumatori di terra rare vi è il Giappone che nel 2016 ha consumato più di ventimila tonnellate di terre rare. Da notare che già in quell'anno il Giappone aveva diversificato i propri approvvigionamenti di terre rare: il 55% – più di undicimila tonnellate – proveniva ancora dalla Cina ma il resto era fornito da Francia e Vietnam (Agency for Natural Resources and Energy, 2020).

Prendendo in considerazione, invece, la domanda di terre rare, le previsioni disponibili indicano che, prendendo come base la produzione del 2019, fino al 2025 la richiesta di elementi rari potrebbe crescere di oltre il 46% (Statista Research Department, 2023). Bisogna tener conto che non tutte le terre rare sono richieste dall'industria globale allo stesso modo. Mentre la maggior parte di tali elementi si manterrà su tassi di crescita simili, si calcola che fino al 2027 la domanda di neodimio e disprosio potrebbe subire un'impennata compresa tra il 700 e il 2600% in quanto componenti essenziali delle tecnologie per le fonti energetiche rinnovabili (Alonso et al., 2012).

Passando ad esaminare le dinamiche dei prezzi dei composti contenenti terre rare, si nota come questi negli ultimi dieci anni sono stati estremamente instabili. Nel 2010 in media un chilogrammo di composti di elementi rari costava 18 dollari: nel 2011 i prezzi erano saliti vertiginosamente, fino a raggiungere i 270 dollari per ogni chilogrammo. In seguito, i prezzi sono calati sui 18,5 dollari nel 2015 per toccare i 7,5 per chilogrammo nel 2017 (Argus Media Group, 2017).

3.3.4 Le strategie cinesi d'esportazione nel corso del tempo

La Cina, in virtù della sua posizione di principale produttore mondiale, ha usato la sua posizione per influenzare le dinamiche di mercato delle terre rare perseguendo, come si vedrà, molteplici scopi: di fatto, nell'ultima decade le autorità di Pechino hanno cambiato molto spesso il regime di esportazione di questi prodotti. La letteratura sull'argomento tende a suddividere l'approccio della Cina all'export di terre rare in tre periodi: periodo del sostegno, periodo restrittivo e periodo della proibizione (Zhang et al., 2015).

Nel primo periodo, dal 1980 al 2003 la Cina supportava l'esportazione di terre rare. Questa impostazione cambiò nel secondo periodo, dal 2004 al 2007, quando le autorità di Pechino iniziarono ad imporre tariffe per l'esportazione di elementi rari e diverse altre restrizioni al loro commercio. Nell'ultimo periodo, soprattutto dal 2008 al 2011, le restrizioni all'export furono rafforzate ed estese. A partire dall'autunno del 2009 le autorità cinesi hanno ridotto le esportazioni del 28% aumentando i dazi d'uscita. Vi furono ulteriori riduzioni nell'ordine del 35% nel 2011 e nel 2012. Con questa mossa la Cina ha spiazzato tutte le previsioni precedenti al settembre del 2009 poiché esse prevedevano aumenti progressivi di produzione nell'ordine di decine di migliaia di tonnellate all'anno mentre Pechino con la sua mossa andava nella direzione opposta. Questa dinamica ha assunto più vigore per effetto della crescita esponenziale dei prezzi dovuta alla speculazione sui contratti *futures*¹⁰. Il lantanio passò da 7,49 a 50 dollari al chilo, il cerio da 6,42 a 50, il disprosio da 200,50 a 286, il terbio da 500,44 a 615: rispettivamente questi elementi incrementarono il loro valore del 1335,5%, del 1544,8%, dell'800% e del 22,9% in confronto al 2007 (Giannuli, 2014). L'atteggiamento cinese portò ad una decisione dell'Organizzazione Mondiale del Commercio decisamente contraria alle limitazioni dell'export di terre rare decise da Pechino. La Cina, dopo alcune proteste formali, si uniformò alle indicazioni dell'OMC e rimosse le restrizioni che erano contrarie allo statuto

¹⁰ I *futures* sono contratti di compravendita di beni o di attività finanziarie a prezzi e quantità prefissati, la cui esecuzione è stabilita per una data futura. Sono contratti a termine, di tipo standardizzato, scambiati su mercati specificamente organizzati. La stipula avviene sempre tramite un intermediario e i pagamenti sono regolati da una *clearing house*, chiamate in Italia "casse di compensazione". Fanno parte dei cosiddetti "strumenti derivati" e svolgono la funzione di proteggersi dai rischi di negoziazione e per diffondere il rischio di mercato presso una platea più vasta di operatori.

e agli altri accordi che aveva siglato con i membri dell'organizzazione (World Trade Organization, 2017). La decisione di presentare ricorso all'OMC da parte di Stati Uniti, UE e Giappone fu stimolata anche da trentatré associazioni di imprese industriali di altrettanti paesi che chiedevano di condurre la Cina a più miti consigli (Il Sole 24 Ore, 2010).

Nonostante la Cina abbia dovuto cambiare impostazione di fronte alle pressioni e alle decisioni degli organismi finanziari internazionali, si può sostenere che le politiche implementate da Pechino hanno riportato diversi successi. In primo luogo, alcuni studiosi, analizzando il periodo che va dal 2001 al 2010, hanno riscontrato che il “potere di mercato”¹¹ – calcolato sulla base dell'indice di Lerner (1934) – delle terre rare cinesi è cresciuto del 140,2% negli Stati Uniti. Ciò ha significato che le autorità di Pechino, almeno per il primo decennio del XXI secolo, hanno potuto manipolare quasi indisturbate i prezzi degli elementi rari a proprio piacimento senza che ciò comportasse ricadute negative. Queste considerazioni valgono soprattutto per il mercato giapponese dove, nello stesso periodo, i composti di terre rare provenienti dalla Cina hanno aumentato il proprio potere di mercato del 244% (Zhang et al., 2015).

In second'ordine, si è constatato che i prezzi sono cresciuti lentamente con il passaggio dal periodo del sostegno a quello restrittivo. Nell'ultimo decennio, di fatto, ad ogni calo delle esportazioni cinesi di terre rare ci si aspetta un importante rialzo dei prezzi (Zhang et al., 2015). Tuttavia, è stato parimenti notato che il potere di mercato cinese in questo campo non sempre si traduce in maggior benefici per Pechino. I vistosi rialzi dei prezzi avvenuti nell'ultimo decennio hanno spinto le altre nazioni, soprattutto quelle che si basano su produzioni tecnologicamente avanzate, ad adottare due tipi di risposte: cominciare o riprendere a sfruttare i giacimenti domestici di terre rare o, attraverso la ricerca, cercare altri elementi o composti che possano rimpiazzare gli elementi rari. Queste azioni hanno contribuito a calmierare i prezzi delle terre rare.

La Cina, inoltre, ha fatto ricorso alla manipolazione delle esportazioni e dei prezzi delle terre rare che andavano oltre il mero profitto economico. Il caso più clamoroso, che ha

¹¹ Tale espressione è di solito utilizzata in riferimento ad imprese pubbliche o private e non ad intere entità statali. Ad ogni modo, con potere di mercato si indica una situazione in cui un'impresa può aumentare in modo profittevole il prezzo di mercato di un bene o di un servizio al di sopra del costo marginale. In altre parole, in presenza di potere di mercato si verificano condizioni per cui un'azienda può alzare il prezzo senza perdere clienti. Le imprese con potere di mercato sono dunque quelle che fanno il prezzo – altrimenti dette *price makers* –, in contrapposizione a quelle che subiscono il prezzo – *price takers* – operanti in un mercato in condizioni di concorrenza perfetta.

contribuito a identificare gli ultimi anni come il periodo della proibizione, è stato il restringimento repentino delle esportazioni delle terre rare verso il Giappone all'indomani di uno degli incidenti diplomatici riguardante la disputa sulle Senkaku/Diaoyu nel 2010 (Ting, 2010). Alle azioni attuate da Tokio, le autorità cinesi fecero seguire ulteriori strette sull'export di terre rare e modificarono al rialzo i prezzi di molte di esse: le speculazioni finanziarie internazionali fecero il resto contribuendo attivamente a spingere verso vette mai prima di allora raggiunte il costo di questi prodotti minerari. Gli scenari che si delineavano iniziarono a preoccupare anche illustri economisti che lanciarono più di un allarme sui possibili risvolti negativi per l'intera economia mondiale se lo scontro politico-economico sulle terre rare fosse andato avanti a lungo (Krugman, 2010).

Tuttavia, nell'ultimo decennio a destare preoccupazione non erano soltanto le restrizioni all'esportazione della produzione interna di terre rare da parte del governo di Pechino. I progetti di ricerca e sfruttamento di depositi di elementi rari da parte di enti cinesi al di fuori del loro territorio nazionale hanno suscitato più di un timore. Di fatto, la Cina, anche al fine di acquisire nuove tecnologie, ha puntato su collaborazioni con imprese statunitensi, europee e nipponiche. Ad esempio, un gruppo di investimento statunitense, con base a Chicago – MP Mine Operations –, dopo aver stretto un accordo con un'impresa mineraria cinese che si occupa di terre rare – Leshan Shenghe Rare Earth Co. –, aveva piazzato l'offerta vincente per parte della concessione riguardante la dismessa miniera di Mountain Pass (Topf, 2017).

Il combinato disposto delle suddette strategie, domestiche e internazionali, consente alla Cina di controllare il 42% dei depositi sfruttabili al mondo di terre rare oltre che ad assicurarsi una posizione di quasi monopolio nel loro mercato (Okabe, 2017).

Di fronte a questa situazione gli altri stati cercano di differenziare le proprie fonti di approvvigionamento di terre rare seguendo strade diverse. Il Giappone si sta rivolgendo ad altre nazioni, come Kazakistan (Jamasmie, 2015) e Vietnam (Fuyuno, 2012), per ottenere gli elementi rari di cui le proprie produzioni high tech hanno bisogno. L'India, dal canto suo, sta esplorando i fondali oceanici alla ricerca di terre rare. Gli Stati Uniti, invece, puntano sull'innovazione e la ricerca, soprattutto nel campo dei magneti, sfruttando materiali e tecnologie disponibili nel paese (King, 2017).

3.3.5 I fattori che influenzano il mercato delle terre rare

Si può riassumere quanto scritto, così come hanno fatto alcuni autori, sostenendo che il mercato delle terre rare è caratterizzato da sei problemi: potenze in continua competizione, nazionalismo energetico, opacità del mercato, mancanza di fiducia reciproca fra i vari attori in gioco e una visione di lungo periodo che spesso si scontra con l'orientamento al profitto di molte imprese (Klossek et al., 2016).

Tuttavia, vi sono altri due fattori, a cui si è già accennato in precedenza, che possono avere un forte impatto sul mercato delle terre rare. Il primo è lo sviluppo della cosiddetta green economy. Di fatto, se non saranno sviluppate tecnologie che consentono di evitare o minimizzare l'utilizzo di terre rare, le nuove politiche ecocompatibili della Cina e delle altre potenze economiche potrebbero far aumentare la domanda e i prezzi degli elementi rari. Nei prossimi vent'anni le politiche dei paesi avanzati per il passaggio da veicoli alimentati da combustibili fossili a quelli elettrici così come il progressivo sviluppo delle nuove generazioni di turbine elettriche per sfruttare l'energia eolica sarà alla base di una domanda che supererà di gran lunga l'offerta. Forme di produzione ecocompatibili e domanda crescente avranno un'importante influenza sulla stabilità del mercato. Per contro, le scoperte scientifiche nel campo della sostituzione degli elementi rari, le fonti non tradizionali unite all'espansione delle pratiche di riciclo e la scoperta di nuovi grandi giacimenti avranno un'influenza bilanciante (Ganguli & Cook, 2018).

L'altro fattore importante per gli andamenti del mercato delle terre rare è la capacità della Cina di controllare il suo mercato illegale interno di elementi rari. Si è osservato che a maggiori controlli delle autorità cinesi corrispondono aumenti dei prezzi (Riesgo García et al., 2017). Tuttavia, si è parimenti osservato che gli aumenti dei prezzi conducono a nuovi progetti di sfruttamento e, anche se la maggior parte dei progetti d'investimento subiscono degli stop durante le fasi calanti dei prezzi, essi proseguono il loro sviluppo grazie ai nuovi investimenti durante le successive fasi ascendenti del mercato (Riesgo García et al., 2017). Inoltre, come si accennava in precedenza, gli aumenti dei prezzi conducono spesso alla riapertura di miniere dismesse come, ad esempio, quella di Mountain Pass in California. Le miniere che stanno producendo al di sotto delle loro possibilità di sfruttamento possono incrementare la produzione allorquando i prezzi torneranno a salire. Quindi, un aumento dei prezzi

condurrà ad una minore dipendenza dalle produzioni cinesi nel medio-lungo periodo, mentre nel breve periodo non avranno un reale impatto sul predominio cinese in questo settore (Ganguli & Cook, 2018).

Riassumendo si può sostenere che prezzi più alti attenueranno molti dei problemi presenti nel mercato delle terre rare poiché la ricerca storica ha dimostrato che a prezzi più alti corrispondono nuove capacità e prospettive produttive.

Rispetto a quanto esposto fin qui, tuttavia, bisogna ricordare che le dinamiche dei prezzi delle terre rare sono state influenzate anche dalla speculazione finanziaria che ha determinato, assieme alle manovre del governo cinese e alle contromosse dei paesi occidentali, l'andamento del mercato.

Le restrizioni all'esportazione da parte delle autorità cinesi e gli aumenti dei prezzi degli elementi rari avevano suscitato negli altri produttori mondiali una generale aspettativa per incrementi sempre più alti dei prezzi di queste materie prime. Di conseguenza, molte imprese al di fuori della Cina hanno effettuato a partire dall'autunno del 2009 massicci investimenti finanziando nuovi progetti di ricerca e sfruttamento o riaprendo le vecchie miniere dismesse. La *Lynas* riprese a produrre e lavorare terre rare in Australia, estratte soprattutto dalla miniera di Mount Weld: il valore delle sue azioni aumentò del 120% in tre mesi (Gholz, 2014). Nel 2012 la *Molycorp*, come si è già accennato in precedenza, riprese le attività estrattive nella miniera dismessa di Mountain Pass e le sue azioni crebbero in pochi mesi del 150% (Gorman, 2009). Le aziende canadesi *Ucore Rare Metals* e *Rare Element Resources* videro aumentare vertiginosamente i propri valori azionari – rispettivamente del 50% e del 300% – apprendo progetti di sfruttamento sia in Alaska (Barker & Van Gosen, 2012) che in Wyoming (*Rare Element Resources Ltd.*). Inoltre, un consorzio di società minerarie coreane e giapponesi ha investito 1,8 miliardi di dollari per acquistare il 15% di *Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineracao* sperando in favorevoli ricadute per i propri affari (Jin & Park, 2011).

Tuttavia, l'euforia dovuta al rialzo dei prezzi e le ottimistiche previsioni sul mercato delle terre rare durarono poco. La *Molycorp*, che nel 2011 aveva visto i propri profitti toccare la quota di 118 milioni di dollari, nel 2012 registrò perdite per circa 450 milioni (Bellomo, 2013). Altre attività subirono la stessa sorte, importanti piani d'investimento furono accantonati.

Le alterne fortune delle compagnie che si occupano di produrre e commercializzare terre rare hanno diverse spiegazioni. Un primo fattore di cui tener conto è la generale crisi economica che si è manifestata a livello globale dal 2008. Di fatto, la crisi ha fatto diminuire i consumi e questa dinamica ha influito anche sulla domanda di terre rare. Inoltre, la Cina ha dovuto fare i conti con un'endemica produzione clandestina di terre rare che in parte ha inficiato i suoi sforzi di controllare il settore. Nel 2010, ad esempio, le autorità cinesi prevedevano di produrre poco più di 89 mila tonnellate di terre rare mentre ne furono prodotte circa 119 mila: la quota eccedente i programmi di Pechino fu prodotta clandestinamente e per la stragrande maggioranza fu esportata (Giannuli, 2014). Infine, bisogna prendere atto che i vertiginosi aumenti dei prezzi tra il 2010 e il 2011 non sono stati solo il frutto di pure dinamiche di mercato tra offerta e domanda reale: si era andata formando una bolla speculativa che si è andata via via sgonfiando perché essa si basava su aspettative fallaci e non aveva tenuto debitamente conto dei pesanti oneri economici che quasi sempre sono richiesti per produrre terre rare (Giannuli, 2014).

3.3.6 Conclusioni

L'importanza geopolitico-economica delle terre rare può essere riassunta in due tendenze principali. La prima è il ruolo da quasi-egemone assunto dalla Cina negli ultimi quarant'anni che consente al gigante asiatico di manipolare con una certa efficacia e spesso proprio vantaggio i prezzi di queste materie prime utilizzandole come efficace strumento di pressione internazionale – se non come vero e proprio mezzo di rappresaglia. Si è voluto sottolineare che la Cina non ha il totale controllo del mercato – o che comunque non riesce a controllare tale mercato a suo piacimento dato che, oltre che alle contromisure messe in atto dagli altri produttori e consumatori, in Cina è fiorente un esteso mercato nero delle terre rare che mina il controllo del governo di Pechino su questo settore. Inoltre, le manovre restrittive cinesi hanno provocato degli effetti contro-intuitivi rispetto agli scopi che si erano prefisse in un primo momento: la stretta ha solo momentaneamente aumentato i guadagni per le imprese cinesi ma non è riuscita, grazie ai contratti *futures* e alle nuove ricerche, ad assestare un colpo fatale all'industria *high tech* nipponica ed occidentale né a forzare il trasferimento delle sedi produttive di queste aziende all'interno della Cina per evitare i dazi.

La seconda è quella che riguarda più direttamente le operazioni finanziarie che si sono sviluppate attorno al mercato delle terre rare. Le operazioni di natura geopolitico-economica che la Cina ha implementato nel precedente decennio hanno dato l'avvio a un vorticoso ciclo di miracolose ascese e disastrose cadute dei titoli delle compagnie che si occupano di estrazione, raffinazione o commercializzazione delle terre rare. In più occasioni, molte compagnie statunitensi, europee e giapponesi, guardando alle manovre di Pechino e all'impennata dei prezzi degli elementi rari, hanno predisposto imponenti piani d'investimento che si sono rivelati fallaci dando origine a bolle speculative che li hanno sostenuti solo per breve tempo. Di fatto, passata la fase più acuta delle restrizioni cinesi sulle terre rare e dopo il conseguente calo dei prezzi, molti progetti di esplorazione o di sfruttamento sono stati abbandonati perché considerati non più remunerativi: le imprese che hanno tentato di costruire la propria fortuna sfruttando le manipolazioni cinesi sono fallite o hanno dovuto ridimensionare di molto i propri progetti cercando di minimizzare le perdite. I rialzi più recenti dei prezzi delle terre rare – così come di altri elementi e composti che fanno parte delle materie prime critiche e strategiche – sembrano connessi non ha dinamica geopolitiche di breve periodo ma a tendenze economico-industriali di medio o lungo termine, come la doppia transizione verde e digitale.

Di fronte a tali evidenze, si può senz'altro sostenere che la Cina conserva ancora una forte posizione nel mercato delle terre rare ma proprio il suo tentativo di sfruttare positivamente la sua posizione ha dato l'avvio ad azioni che in prospettiva rischiano di minare la propria forza nel settore. Tuttavia, la sua egemonia non sembra possa essere scalfito da effimeri piani d'investimento, prodotti sulla base dell'euforia per congiunture politico-economiche particolari, ma semmai da piani d'azione di lungo periodo concertati da consorzi di aziende e di paesi.

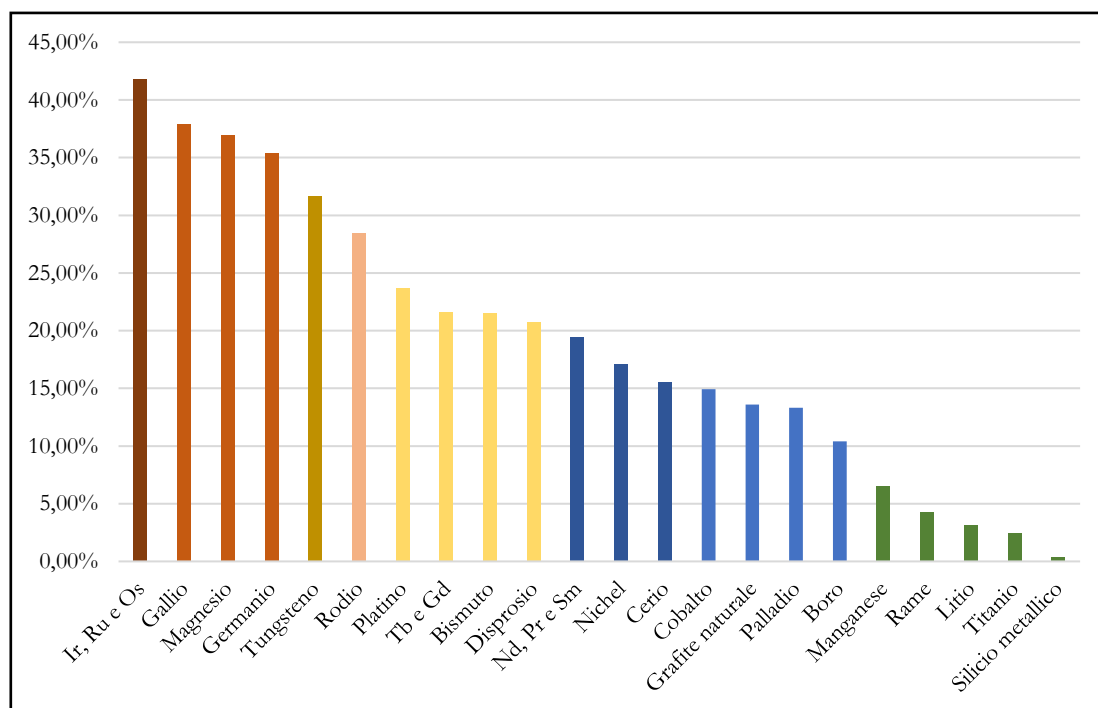
4 Risultati e discussione

Dopo aver affrontato più specificamente nelle precedenti tre sezioni alcuni temi specifici legati alle materie prime critiche, l'attenzione verrà ora di nuovo focalizzata sullo scopo ultimo di questo lavoro di tesi: indentificare le quote di import europeo a rischio per i diversi

strategic raw materials e tentare di analizzarne l'importanza per l'autonomia strategica dell'Unione europea.

Si procederà, quindi, con l'illustrare i risultati dell'elaborazione dei dati raccolti per sintetizzare, tramite l'equazione presentata nella sezione riguardante il metodo, l'indicatore di rischio geopolitico nell'approvvigionamento – *Geopolitical Supply Risk*.

Grafico n. 3 – Indicatore di rischio geopolitico nell'approvvigionamento per l'UE, 2016-2020



Fonti: elaborazioni su dati *Eurostat*, *UN Comtrade* e *Banca Mondiale*.

Prima di inoltrarsi nel commento e nelle spiegazioni del Grafico n. 2, occorre ricordare in breve cosa esprime il *Geopolitical Supply Risk*, ovvero, nel caso in esame, il rischio geopolitico nell'approvvigionamento delle materie prime strategiche da parte dell'Unione europea. Come già accennato più sopra, il numero, ricavato tramite la già illustrata equazione, indica la quota relativa alle importazioni di un determinato bene, in questo caso di una risorsa, la cui fornitura è a rischio di interruzione; quindi, ancora più sinteticamente, la percentuale di import di una materia prima strategica che può verosimilmente subire interruzioni.

Rivolgendo ora l'attenzione al Grafico n. 3, il quadro che questo presenta è critico, o relativamente critico, per l'Unione europea. I diversi colori e le loro diverse sfumature aiutano

ad avere una rapida visione d'insieme delle forniture più problematiche. Innanzitutto, si può notare come poco meno della metà, tredici su ventisette, degli elementi, o dei composti, presi in considerazione presentino quote di approvvigionamento a rischio elevate o relativamente elevate: ovvero, per queste materie prime strategiche almeno un quinto, se non un quarto o più, dell'import potrebbe subire interruzioni.

Gli elementi strategici che presentano la quota più elevata di approvvigionamento a rischio sono l'iridio – Ir –, il rutenio – Ru – e l'osmio – Os –: questa è pari a quasi il 41,8%. La spiegazione di una quota di import a rischio così elevata risiede, come si era anticipato, nella struttura delle importazioni e della produzione mondiale di questi elementi nonché nella valutazione sintetica, effettuata dalla Banca Mondiale, delle condizioni stabilità politica, di assenza di violenza e di terrorismo dei principali paesi fornitori. Di fatto, l'Unione europea, importa quasi un terzo del proprio fabbisogno di questi elementi dal Sudafrica che è di gran lunga anche il primo produttore globale: oltre il 93% di queste materie prime viene estratto e in parte lavorato nel principale paese dell'Africa australe. In aggiunta a ciò, il punteggio attribuito dalla Banca Mondiale al Sudafrica in merito alla stabilità politica e alla mancanza di violenza non è molto elevato – 0,35. Da quanto appena illustrato, si comprende il perché dell'elevata quota a rischio per l'iridio, il rutenio e l'osmio. Gli altri fornitori europei, alcuni dei quali riforniscono l'Unione con quote simili a quella sudafricana – come il Regno Unito – si pongono molto più in basso, al di sotto dell'un per cento, nella produzione mondiale di queste risorse. Eventuali interruzioni nell'approvvigionamento di queste risorse potrebbero influenzare la produzione di componenti elettronici per computer, di strumentazioni ottiche, di composti chimici ed elettrochimici il cui valore aggiunto nel 2018 si avvicinava ai 435 miliardi di euro (SCRREEN2 Project, 2023a)

Proseguendo in tale disamina, le ragioni alla base dell'elevata quota – 37,9% – di approvvigionamento a rischio di interruzione del gallio si possono rinvenire nell'elevata porzione – 71% – delle importazioni europee provenienti dalla Cina e dal predominio di quest'ultima nella produzione mondiale di questo elemento: si stima che, a livello globale, il 94% del gallio provenga dalla Cina. Tuttavia, sebbene la combinazione di quote di importazione e produzione mondiale dia un risultato più elevato rispetto a quanto risulti per iridio, rutenio e osmio, l'indicatore di stabilità politica e mancanza di violenza della Banca Mondiale relativo alla Repubblica Popolare è più alto raggiungendo lo 0,41%. Se l'import di gallio dovesse essere

minacciato, la manifattura europea di parte consistente dei circuiti integrati, degli strumenti per l'illuminazione e dei pannelli solari – il cui valore aggiunto è di quasi 181 miliardi di euro – potrebbe subire interruzioni o ritardi nella sua produzione (SCRREEN2 Project, 2023b).

Con una quota di importazioni a rischio leggermente più bassa – quasi del 37% – del precedente vi è il magnesio. In questo caso, come in diversi altri, viene ricalcato lo schema del gallio: l'Unione europea importa quasi il 60% del suo fabbisogno di magnesio dalla Cina che a livello globale ne produce circa il 91%. Fermo restando la suddetta valutazione della Banca Mondiale, risulta evidente che i livelli – di poco – più bassi relativi a quote di importazione e produzione mondiale risultino in una quota a rischio leggermente più bassa per questo elemento. In questo caso, se l'import di magnesio subisse interruzioni, a rischio ci sarebbero le produzioni di mezzi di trasporto, dei materiali da imballaggio e da costruzione, di agenti di desolfurazione usati nell'industria siderurgica per un valore pari a oltre 533 miliardi di euro (SCRREEN2 Project, 2023c).

Questa tendenza prosegue con il germanio che presenta una quota di import a rischio del 35,4%. In questo caso, il calo è più evidente in quanto la Cina fornisce all'Unione il 45% del germanio di cui ha bisogno: una differenza rispetto al magnesio di poco meno di 15 punti percentuali. Contribuisce alla minore quota a rischio anche la circostanza che il secondo e il terzo fornitore sono stati membri dell'Unione europea: Belgio – con il 32% – e la Germania – con il 19%. Questi due stati godono di indicatori di condizioni di stabilità politica, di assenza di violenza e di terrorismo decisamente migliori della Cina attestandosi entrambi intorno a 0,62. Tuttavia, sebbene contribuiscano in maniera sostanziale alla fornitura di germanio all'Unione, a livello globale la loro produzione di tale elemento si attesta rispettivamente al 4% e al 3% mentre la Cina stacca nettamente questi paesi europei con una quota di produzione globale dell'83%. Risiede qui la ragione principale del calo della quota a rischio: più marcato rispetto ai precedenti, ma non esattamente proporzionale alla “tripartizione” della fornitura di germanio all'Unione europea. Il germanio trova applicazione nelle fibre ottiche, nelle ottiche ad infrarossi e nella costruzione di pannelli solari per satelliti e sonde spaziali: se la sua fornitura fosse interrotta, la manifattura di prodotti con valore aggiunto di oltre 181 miliardi di euro potrebbe subire conseguenze decisamente negative (SCRREEN2 Project, 2023d).

Il successivo elemento, il tungsteno, si presenta con una quota di approvvigionamento a rischio di circa il 31,7%. In questo caso, i primi quattro fornitori sono tutti “extra-comunitari”: Cina – che rifornisce l’Unione del 31% di cui ha bisogno –, il Vietnam – del 14%, – Stati Uniti e Russia – entrambi del 9%. Il resto è parcellizzato tra una miriade di fornitori. Si nota come la quota fornita dalla Cina continua a scendere: tuttavia, è utile ricordare anche in questo caso, che la produzione mondiale di questo elemento è concentrata soprattutto in Cina che ne produce circa l’83%. Inoltre, sia il Vietnam che gli Stati Uniti, sebbene si pongano più in alto della Cina nella classifica della stabilità politica e dell’assenza di violenza rispetto alla Cina, non hanno punteggi molto più alti: di fatto, entrambi si attestano intorno allo 0,49. D’alto canto, alla Federazione russa è stata attribuita una valutazione decisamente più bassa sia rispetto alla Cina che rispetto a Vietnam e Stati Uniti, posizionandosi circa a 0,31. Quest’insieme di fattori porta il tungsteno a rientrare fra quegli elementi e composti che hanno circa un terzo del loro import europeo a rischio di interruzione. Se le forniture di tungsteno dovessero interrompersi, diverse produzioni – che vanno dagli utensili da taglio alle applicazioni aeronautiche ed energetiche passando per illuminotecnica e catalizzatori – con un valore complessivo di quasi 590 miliardi di euro potrebbero dover abbassare drasticamente i propri ritmi (SCRREEN2 Project, 2023e).

Il primo elemento con una quota di approvvigionamento a rischio inferiore al 30% è il rodio. Infatti, per questo elemento, facente parte dei metalli del gruppo del platino – come iridio, rutenio e osmio –, l’equazione restituisce un valore pari a 28,5%. Il primo fornitore di rodio all’Unione europea è anche in questo caso il Sudafrica. Tuttavia, la sua quota di produzione globale, l’81%, è inferiore a quella, il 93%, degli altri elementi del gruppo del platino già incontrati. Il rodio trova ampio impiego in catalizzatori per auto, vetri, prodotti chimici ed elettronici: l’interruzione della sua fornitura minaccerebbe produzioni dal valore aggiunto pari a oltre 521 miliardi di euro (SCRREEN2 Project, 2023a).

Proseguendo, si assiste ad un calo relativamente più marcato dei precedenti: infatti, la quota di import del platino a rischio interruzione è di circa il 23,7%. Rispetto agli altri elementi dello stesso gruppo, il cambiamento in questo caso è dovuto al fatto che il principale fornitore di platino dell’Unione europea è il Regno Unito – per parte del periodo preso a riferimento ancora stato membro dell’Unione europea – con una quota di quasi il 52%. Il Sudafrica è al secondo posto, “molto staccato” dal primo fornitore, con circa il 18%. Inoltre, vi sono anche

Svizzera, con circa l'8%, e la Russia, con il 7%. In questo caso, la presenza del Regno Unito, come fornitore principale, e della Svizzera, che presentano valutazioni positive, o molto positive, riguardo alla stabilità politica e all'assenza di violenza – rispettivamente circa 0,60 e 0,73 – potrebbe condurre a pensare che il calcolo del rischio geopolitico legato all'approvvigionamento dovrebbe presentare un valore ancora più basso. In realtà, se si guarda alla terza componente dell'equazione – la quota di produzione mondiale della particolare risorsa – si constata che, sebbene Regno Unito – e in subordine la Svizzera – siano importanti fornitori dell'Unione, in realtà la produzione inglese comprende una quota compresa tra il 4 e il 5% a livello globale. Di contro, il Sudafrica ne produce oltre il 70% e la Russia circa il 12%. Inoltre, questi due stati riportano un basso punteggio per quanto riguarda la stabilità politica e l'assenza di violenza che “pondera al ribasso” il risultato finale. Il platino trova applicazione in molti settori: dalla gioielleria alla manifattura del vetro, dai catalizzatori per auto ai prodotti petroliferi, nonché nell'industria legata all'elettronica e ai prodotti chimico-farmaceutici. Se le forniture di questa materia prima strategica dovessero interrompersi allora la produzione a rischio potrebbe raggiungere un valore di oltre 591 miliardi di euro (SCRREEN2 Project, 2023a)

Si incontrano ora terbio e gadolinio, materie prime strategiche appartenenti al gruppo delle terre rare – che in totale, come si è già visto in precedenza, comprendono diciassette elementi, i lantanidi più l'ittrio e lo scandio – la cui quota di approvvigionamento a rischio interruzione è pari al 21,6%. In questo caso, si assiste al “ritorno” della Cina come principale fornitore di materie prime strategiche. Di fatto, la Repubblica Popolare è sia il primo fornitore di questi elementi all'Unione, pari al 64% del suo import, sia il primo produttore globale con una quota del 68%. Altri fornitori sono il Giappone – 17% –, il Regno Unito – 8% –, la Federazione russa – 5% – e la Corea del Sud – 3%. Tuttavia, mentre la Cina genera globalmente più dei due terzi della produzione globale, gli altri fornitori hanno quote molto più basse, oscillanti intorno all'1%, tranne la Russia che si attesta al 2%. Le due materie prime strategiche in questione sono utilizzate per la produzione di magneti, metalli e leghe, strumenti per l'illuminazione e, in campo sanitario, macchine per la risonanza magnetica. In caso di interruzione della loro fornitura ne risentirebbero settori che insieme raggiungono un valore aggiunto di 516 miliardi di euro (SCRREEN2 Project, 2023f).

Una dinamica simile, ma con caratteristiche proprie, si osserva per il bismuto. La quota di import europeo di questo elemento che è a rischio di interruzione è pari al 21,5%. Come in diversi dei casi esaminati finora, il principale fornitore all'Unione di bismuto è la Cina, con una quota pari al 63%. La Cina è anche il principale produttore mondiale di questa risorsa: il 68% di tutto il bismuto in commercio proviene dalla Repubblica Popolare. Ritornando alla struttura europea delle importazioni, l'Unione importa la maggior parte del bismuto di cui ha bisogno, oltre che dalla Cina, da un insieme di nazioni asiatiche: Thailandia – 13% –, Laos – 10% –, Corea del Sud – 6% – e Vietnam 4%. Nonostante queste nazioni presentino dei livelli di stabilità politica e assenza di violenza migliori rispetto alla Cina – dallo 0,42 della Thailandia allo 0,66 del Laos –, non riescono a controbilanciare il peso della Cina: non solo in quanto la quota di esportazioni della Repubblica Popolare verso l'Unione è molto maggiore ma anche perché la quota di questi paesi nella produzione mondiale di bismuto, con la parziale eccezione del Vietnam – che raggiunge il 17% –, si attesta intorno al 2%. Questo *strategic raw material* viene utilizzato nella fabbricazione di prodotti chimici, leghe metallurgiche e fusibili. Un'eventuale interruzione nell'approvvigionamento di bismuto metterebbe a repentaglio la produzione di settori con un valore aggiunto di circa 249 miliardi di euro (SCRREEN2 Project, 2023g).

Si incontra ora l'ultimo elemento la cui quota di importazioni a rischio di interruzione è superiore a un quinto del totale. Infatti, la quota di approvvigionamento a rischio del disprosio, altro elemento appartenente alle terre rare, è del 20,7%. La Cina domina anche in questo caso: è il primo fornitore di disprosio all'Unione europea – con una quota del 61% – e il primo produttore globale – con una quota del 68%. Per esportazioni verso l'Europa, seguono la Russia – 19% –, il Giappone – 14% –, e il Regno Unito – 6%. Questo elemento viene utilizzato esclusivamente nella produzione di magneti; l'interruzione del suo rifornimento causerebbe non pochi problemi a un settore con un valore aggiunto di 183 miliardi di euro (SCRREEN2 Project, 2023f).

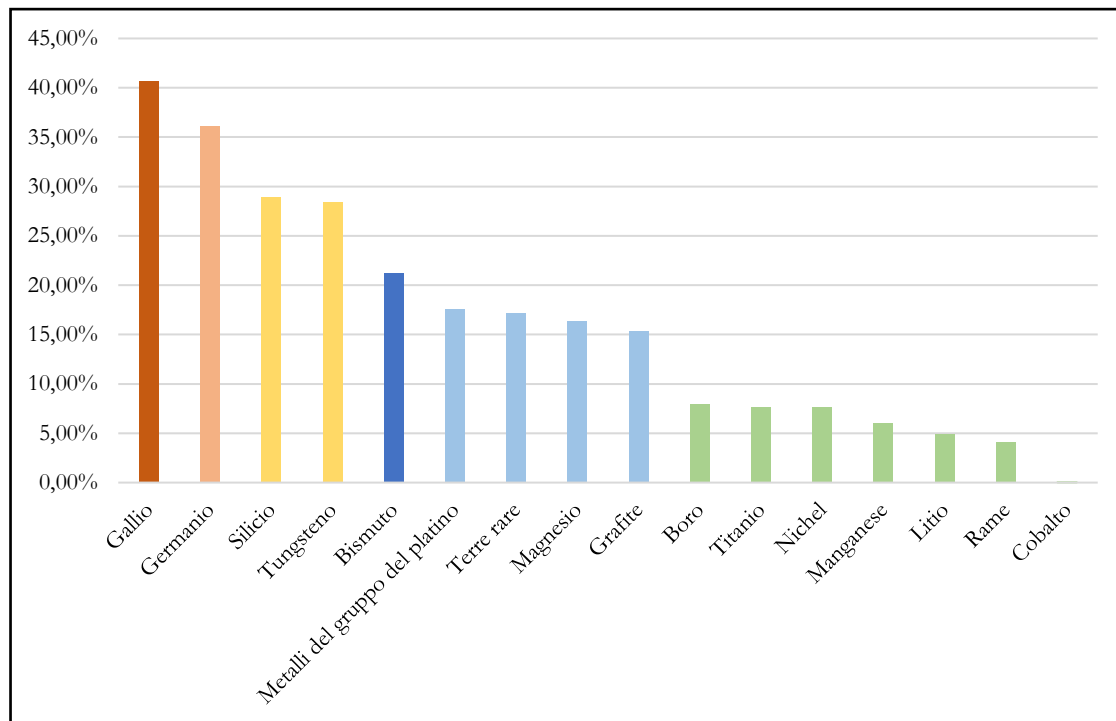
Quasi immediatamente al di sotto del 20% di quota di import a rischio interruzione troviamo altri elementi appartenenti alle terre rare: ovvero, neodimio, praseodimio e samario con una quota a rischio del 19,4%. Le importazioni dell'Unione europea di questi ultimi elementi sono ancora una volta dominate dalla Cina che fornisce all'Unione l'80% del proprio fabbisogno, seguono Regno Unito – 3% – e Stati Uniti – 2%. Come nei casi precedenti la

Cina produce il 68% di tali elementi a livello globale. Il rischio in questo caso è ridimensionato in parte dalle quote importate dai paesi anglosassoni, che godono di migliori valutazioni per quanto riguarda stabilità politica e assenza di violenza, ma anche dalla parcellizzazione delle ulteriori quote di import suddivise tra una miriade di altri fornitori. Tuttavia, è importante sottolineare che tali elementi, in particolare il neodimio, stanno diventando via via indispensabili per la produzione di magneti e batterie altamente performanti in diversi comparti, in particolare nel settore automobilistico dove sono ormai parte essenziale dei motori per veicoli elettrici e per le turbine delle pale eoliche. Altre applicazioni comprendono: apparati catalitici veicolari, apparecchiature ottiche ed elettromedicali, ceramiche, vetri, leghe metalliche speciali. Si tratta di comparti e di prodotti che, come accennato più volte, sono alla base della futura industrializzazione – che si vorrebbe verde e digitale – e, nel complesso, questi settori raggiungono il ragguardevole valore aggiunto di 623 miliardi di euro (SCRREEN2 Project, 2023f). Appare evidente che una quota molto vicina a un quinto del totale delle importazioni a rischio di interruzione per materie prime così importanti non si combina bene con gli obiettivi industriali e strategici dell’Unione europea.

I successivi undici elementi e composti presentano quote di rischio di interruzione delle importazioni via via declinanti, dal 17% del Nichel allo 0,4% del silicio metallico. I livelli più bassi di import a rischio sono dovuti a una combinazione fra maggiore diversificazione degli approvvigionamenti, una minore concentrazione della produzione mondiale di alcuni elementi e migliore *performance* di una parte dei fornitori europei di queste risorse per quel che riguarda la stabilità politica, l’assenza di violenza e terrorismo.

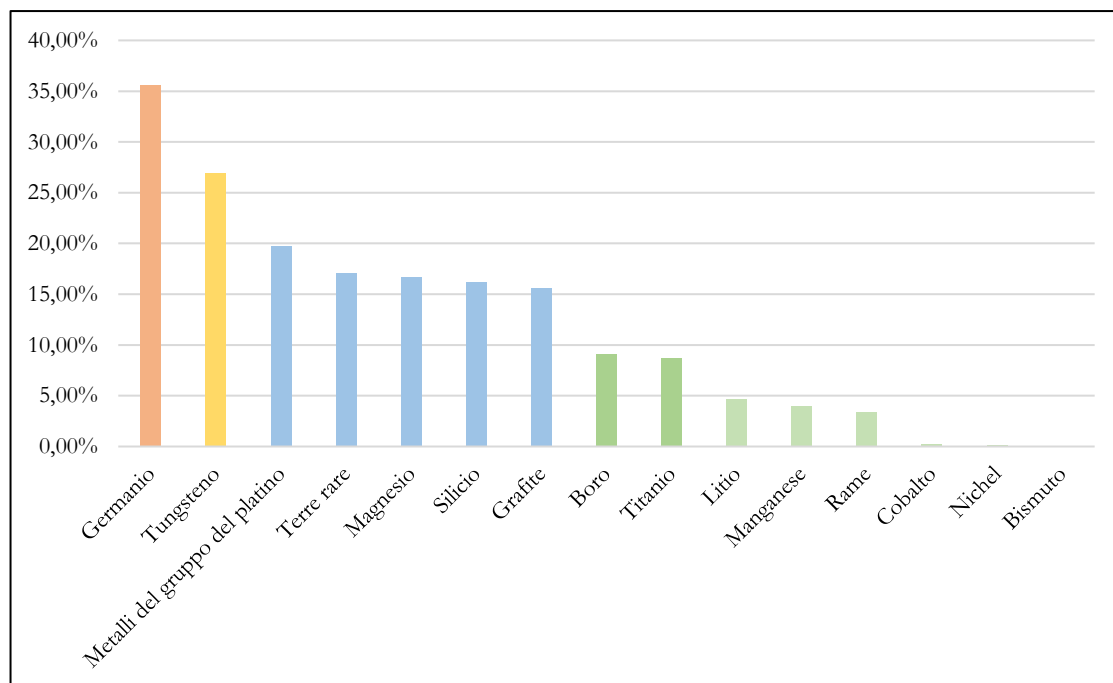
Verranno illustrati ora i risultati del metodo applicato alle importazioni di materie prime strategiche delle prime due economie manifatturiere dell’Unione europea: la Germania e l’Italia. Sebbene, in questo caso, i risultati dell’indagine siano stati disaggregati a livello di singolo paese, per quanto riguarda il calcolo del *geopolitical supply risk*, invece, alcune delle materie prime strategiche sono state aggregate in base ai dati a disposizione: si tratta sostanzialmente delle terre rare e dei metalli del gruppo del platino. In sintesi, come mostrato più in basso, i risultati mostrano che le due principali economie manifatturiere europee hanno meno SRM con alti rischi di approvvigionamento – superiori a un quinto dell’import totale – e un discreto numero di risorse con un medio livello di rischio.

Grafico n. 4 – Indicatore di rischio geopolitico nell'approvvigionamento per la Germania, 2021



Fonti: elaborazioni su dati *Eurostat*, *UN Comtrade*, *World Mining Data* e *Banca Mondiale*.

Grafico n. 5 – Indicatore di rischio geopolitico nell'approvvigionamento per l'Italia, 2021



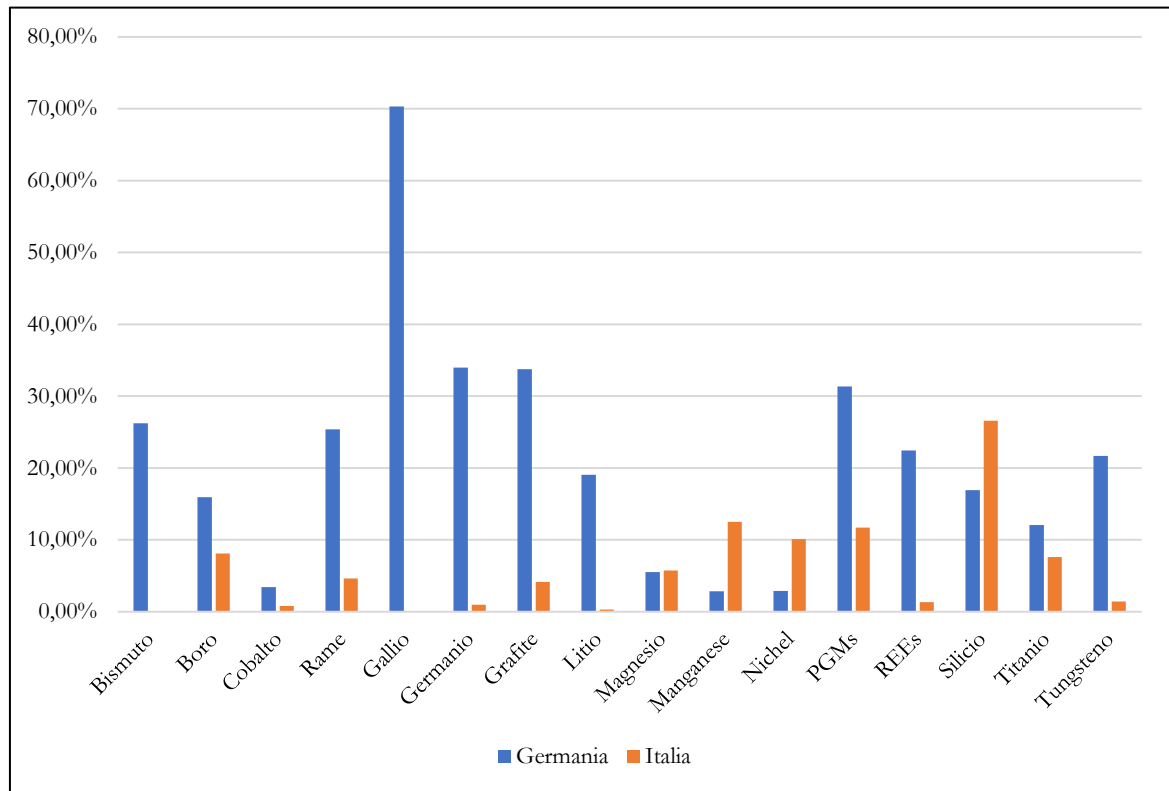
Fonti: elaborazioni su dati *Eurostat*, *UN Comtrade*, *World Mining Data* e *Banca Mondiale*.

Come si può notare, le materie prime strategiche con quote elevate di approvvigionamento a rischio per Germania e Italia sono simili a quelle per l'intera Unione. gallio, germanio, tungsteno, bismuto e metalli del gruppo del platino hanno, per i due paesi presi in considerazione, quote di import a rischio superiori o prossime a un quinto del totale. Inoltre, si può osservare che terre rare, magnesio, grafite e silicio abbiano, per entrambi gli stati membri, quote di importazioni a rischio di livello medio, più basso rispetto ai precedenti, comprese tra il 17,62% e il 15,30%.

Le quote medie di importazioni a rischio sono più basse rispetto a quelle dell'Unione europea considerata nel suo insieme. La quota europea media di import a rischio di *strategic raw materials* è pari al 19,14% mentre quelle tedesche e italiane sono uguali rispettivamente al 16,27% e al 12,73%. Questa riduzione media dei rischi è dovuta principalmente al fatto che i due paesi, seppur non sempre sistemicamente e ordinatamente, hanno diversificato i propri approvvigionamenti. Prendendo ad esempio il gruppo dei metalli del platino – che a livello europeo presenta una quota a rischio media del 26,83%, mentre per la Germania è pari al 17,62% e per l'Italia al 19,75% –, i due paesi analizzati aggiungono ai paesi di provenienza di questi metalli – oltre ai tradizionali Sud Africa, Russia, Regno Unito e Stati Uniti – anche Canada, Colombia, Corea del Sud e India seppur, per il momento, con basse quote di import. Le quote a rischio più elevate – come già visto per l'Unione nel suo complesso – sono dovute a una combinazione fra scarsa diversificazione nell'approvvigionamento, elevata quota di produzione mondiale del paese fornitore di quella particolare risorsa e punteggi relativi alla stabilità politica medi o bassi. Nel caso della Germania, il gallio viene importato per la stragrande maggioranza dalla Cina – quasi 96% del proprio approvvigionamento – che ne domina anche la produzione mondiale – quasi il 93%. Per l'Italia, il germanio viene importato unicamente dalla Cina che, anche in questo caso, è il maggior produttore globale.

Prima di procedere alle conclusioni, è utile notare anche la differenza in termini relativi fra il peso delle importazioni di SRM della Germania e dell'Italia rispetto ai totali dell'Unione europea.

Grafico n. 6 – SRM, quote di import di Germania e Italia sul totale dell'UE, 2021



Fonti: elaborazioni su dati *Eurostat* e *UN Comtrade*.

Si può notare come, rispetto alle quote di importazioni tedesche, quelle italiane siano nella maggioranza dei casi più basse, molto più basse o, nel caso del gallio, inesistenti. Alla luce di quanto esposto sin qui – soprattutto nelle sezioni introduttive e di studio sulla letteratura –, si può senz'altro affermare che le materie prime strategiche non solo sono indispensabili alla produzione manifatturiera nel suo complesso ma sono anche estremamente importanti per diversi settori innovativi, come la produzione *hardware* per l'economia digitale, i sistemi per la transizione verso società a basse emissioni di carbonio, così come per i sensibillissimi settori della difesa e dell'aerospazio. A fronte di questi dati e di queste considerazioni, anche se ciò esula dagli obiettivi e dal tema della presente ricerca, è lecito domandarsi quanto l'Italia sia realmente attrezzata per la doppia transizione verde e digitale nonché quale sia il reale grado di “innovatività” del suo comparto industriale.

5 Conclusioni

Riassumendo quanto fin qui scritto e procedendo verso le conclusioni del lavoro di tesi, occorre innanzitutto constatare quanto segue. Non poche materie prime strategiche importate dall'Unione europea mostrano quote a rischio di interruzione elevate o relativamente elevate.

Le importazioni di tre elementi – iridio, rutenio e osmio – sono a rischio per oltre il 40%. Altri tre – gallio, magnesio e germanio – rischiano interruzioni pari a più di un terzo dell'import. Un altro elemento – il tungsteno – mostra comunque una quota di approvvigionamento a rischio superiore al 30%. Oltre un quarto delle importazioni di rodio sono a rischio. Ben cinque elementi – terbio, gadolinio, bismuto, disprosio e platino – rischiano interruzioni pari a più un quinto dell'import. Altri tre elementi – neodimio, praseodimio, samario – sono in ogni caso molto vicini a quote di approvvigionamento a rischio di quasi un quinto. Le importazioni di sei SRM – nichel, cerio, cobalto, grafite, palladio e boro – sono a rischio con quote comprese tra poco più del 15% e circa il 10% mentre altre cinque materie prime strategiche – manganese, rame, litio, titanio e silicio – rischiano interruzioni per meno del 10% del loro import. Si constata facilmente, quindi, che più della metà – tra le tredici e le sedici – delle materie prime strategiche individuate dalle istituzioni europee hanno quote di approvvigionamento a rischio superiori o pressoché uguali a un quinto del totale.

Considerando che, nello studio da cui è stato tratto il metodo usato in questa ricerca (Gemechu et al., 2016), si descrivevano come “risorse più geopoliticamente critiche” quelle *commodity* che avevano quote di approvvigionamento a rischio – per i diversi paesi testati in quell'occasione – comprese tra minimi che variavano tra 0,21 e 0,26 e massimi che andavano da 0,43 a 0,47, si può affermare che quasi la metà delle materie prime strategiche europee presentano quote di approvvigionamento a rischio elevate, relativamente elevate o con livelli medi di rischio. Altre ricerche, inoltre, definivano valori dell'indice di rischio geopolitico nell'approvvigionamento compresi tra 0,15 e 0,30 come “relativamente alti” (Siddhantakar et al., 2023). A ciò va aggiunto che la quasi totalità delle risorse con quote di importazione a rischio più elevate – e anche quelle con quote meno elevate – non possiedono un buon indice di sostituibilità: ciò significa che non è possibile sostituire tali *strategic raw materials*, in prodotti

lavorati o semi-lavorati, con altri materiali che invece non rientrano in questa categoria, oppure possono essere sostituiti ma con una perdita sensibile della qualità del prodotto finito (Commissione europea, 2023b). Tutte queste considerazioni fanno tendere alla conclusione che il rischio di approvvigionamento complessivo per le materie prime strategiche dell'UE è alto o relativamente alto.

I risultati raggiunti tramite l'analisi delle due più importanti economie manifatturiere europee, inoltre, non differiscono molto da quanto esposto sin qui. In sostanza, i risultati mostrano un rischio medio relativamente più basso in ragione di catene di approvvigionamento più diversificate e della diversa composizione quantitativa degli approvvigionamenti. In ogni caso, non è chiaro se le minori quote a rischio siano il frutto di precise politiche industriali e commerciali, volte a ridurre l'esposizione a shock esterni, oppure l'esito di "fortunate" circostanze contingenti.

Le conclusioni a cui si è giunti, tuttavia, implicano che qualsiasi cambio nelle politiche dei principali paesi produttori extra-europei di materie prime strategiche, l'instabilità internazionale o altri fattori geopolitici possono indurre alti livelli di interruzione nell'approvvigionamento dell'UE. Quanto scritto riflette la fondamentale dipendenza da paesi terzi dell'Unione per le forniture di *strategic raw materials*. Come si combina tutto questo con il concetto e i piani dell'UE per la cosiddetta "autonomia strategica aperta"?

Il concetto di autonomia strategica aperta – *open strategic autonomy*, OSA –, compiutamente elaborata con lo sviluppo della pandemia da SARS-CoV2, riflette il desiderio dell'UE di tracciare il proprio percorso sulla scena globale, cercando di plasmare il mondo che la circonda attraverso la propria *leadership* e l'impegno delle proprie istituzioni e dei propri stati membri, preservando al tempo stesso quelli che vengono identificati come "interessi e valori europei". I piani e le azioni per l'autonomia strategica aperta prevedono di sfruttare al meglio le opportunità offerte dall'apertura internazionale e dall'impegno globale dell'UE, difendendo al contempo con fermezza gli interessi europei, sia internamente che esternamente. In sostanza, l'UE continuerà a collaborare con i partner per portare avanti i programmi condivisi, ma lavorerà in modo autonomo quando necessario (DG COMM, 2021). Dunque, l'autonomia strategica aperta dovrebbe garantire la capacità dell'UE di affrontare da sola le sfide che si trova davanti, se necessario, ma senza escludere la cooperazione quando possibile, tenendo conto della geopolitica e non solo dei fattori economici.

In questo contesto, le materie prime critiche e strategiche sono state definite “fondamentali per l’autonomia strategica dell’UE” ed è ritenuto che la resilienza della loro catena di approvvigionamento sia “alla base della resilienza e dell’autonomia di molti settori industriali, tra cui quelli della difesa e della sicurezza, nel contesto della costruzione di un’autonomia strategica aperta” (Szczepański, 2021). Tuttavia, la portata delle ambizioni sull’autonomia strategica aperta è ancora sfumata e incerta. Sebbene la completa autosufficienza potrebbe sembrare allettante – alla luce della storia di dipendenza dell’Europa dalle importazioni di petrolio e gas –, anche all’interno delle istituzioni europee si ritiene che ciò sarebbe estremamente costoso considerando che non tutte le materie prime strategiche sono presenti sul territorio dell’UE. Piuttosto, l’UE potrebbe combinare il *reshoring* parziale delle materie prime critiche e strategiche con la diversificazione e la gestione del rischio (van Wieringen & Fernández Álvarez, 2022).

Cionondimeno, occorre constatare che, proprio perché le materie prime strategiche sono senz’altro fondamentali per l’autonomia strategica europea e sono alla base di molti settori industriali, tra cui quelli della difesa e della sicurezza, i piani europei risultano monchi e frustrati dalla situazione di sostanziale dipendenza attuale. Per esemplificare questa situazione si illustrerà brevemente il caso del Regolamento UE 2022/576 del Consiglio dell’8 aprile 2022 che introduceva ulteriori misure restrittive e contromisure nei confronti della Federazione russa in risposta all’invasione dell’Ucraina (Consiglio dell’Unione europea, 2022). Tuttavia, all’articolo 3 sexies bis, dopo aver stabilito che a partire dal 16 aprile di quell’anno l’accesso ai porti nel territorio dell’Unione sarebbe stato proibito a qualsiasi nave registrata sotto la bandiera della Russia, il paragrafo 5 disponeva che, in deroga a quanto disposto fin lì, avrebbero potuto attraccare le navi che trasportavano verso l’Unione, fra gli altri, titanio, rame, nichel e palladio. L’Unione europea importava, e importa, elevate quote del proprio fabbisogno di queste materie prime strategiche dalla Russia. Ciò può contribuire a dimostrare che, dopo oltre un mese dall’inizio delle operazioni militari su larga scala, nel momento in cui lo scontro politico-diplomatico – e indirettamente militare – tra Unione europea e Federazione russa stava per conoscere livelli d’intensità più elevati, e quando iniziavano a svanire gli auspici per la cessazione rapida della guerra e la ripresa di un percorso diplomatico (Djurica, 2022; Liffey & Oatis, 2022), i paesi europei non potevano far a meno delle forniture di determinati *strategic raw materials* da parte della Russia.

Quanto appena descritto rende drammatica la situazione attuale per quanto riguarda l'approvvigionamento delle materie prime strategiche. In sintesi, neanche di fronte a una delle più grandi minacce geopolitiche esistenti, la guerra, l'Unione europea ha saputo fornire soluzioni alternative in maniera rapida ed efficace. Ciò significa che i piani approntati fin qui per assicurare al contempo l'autonomia politica dell'Unione e l'approvvigionamento delle materie prime strategiche sono, nella migliore delle ipotesi, insufficienti e carenti. Non si può ancora sapere, ovviamente, se il nuovo *European Critical Raw Materials Act* centrerà gli obiettivi finora mancati e per cui è stato ideato: questo è un compito che si lascia ad altre, future, ricerche.

Bibliografia

- Achzet, Benjamin, and Christoph Helbig. 2013. "How to Evaluate Raw Material Supply Risks-an Overview." *Resources Policy* 38(4). doi: 10.1016/j.resourpol.2013.06.003.
- Agency for Natural Resources and Energy. (2020, Luglio 31). *Japan's new international resource strategy to secure rare metals*. Tratto da Agency for Natural Resources and Energy: https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/special/article/detail_158.html#main
- Alonso, Elisa, Andrew M. Sherman, Timothy J. Wallington, Mark P. Everson, Frank R. Field, Richard Roth, and Randolph E. Kirchain. 2012. "Evaluating Rare Earth Element Availability: A Case with Revolutionary Demand from Clean Technologies." *Environmental Science and Technology* 46(6). doi: 10.1021/es203518d.
- Argus Media Group. (2017, Settembre 6). *Argus Rare Earths Monthly Outlook*. Tratto da Argus Media: <https://www.argusmedia.com/-/media/Files/sample-reports/argus-rare-earths-monthly.ashx?la=zh&hash=0A2D56431CB412656828CA6C5BFB74D09892285A>
- Barker, James C., and Bradley S. Van Gosen. 2012. "Alaska's Rare Earth Deposit and Resource Potential." *Mining Engineering* 64(1).
- Bellomo, S. (2013, Marzo 16). *Terre rare, adesso i produttori soffrono: i prezzi sono crollati*. Tratto da Il Sole 24 Ore: <https://st.ilsole24ore.com/art/finanza-e-mercati/2013-03-16/terre-rare-adesso-produttori-081906.shtml>
- Blengini, G. A., Mathieux, F., Mancini, L., Nyberg, M., & Viegas, H. M. (2019). *Recovery of critical and other raw materials from mining waste and landfills: State of play on existing practices*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Blengini, G. A., Nuss, P., Dewulf, J., Nita, V., Talens Peiró, L., Vidal-Legaz, B., . . . Ciupagea, C. (2017). EU methodology for critical raw materials assessment: Policy needs and proposed solutions for incremental improvements. *Resources Policy*, 53, 12-19.
- Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., Mathieux, F., & Pavel, C. (2020). *Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

- Boland, A., Cherry, M. G., & Dickson, R. (2017). *Doing a systematic review: A student's guide*. Londra: Sage Publications.
- Carrara, S., S. Bobba, D. Blagoeva, Alves Dias, P. Cavalli, A. Georgitzikis, K. Grohol, A. Kuzov, T. Latunussa, C. Lyons, G. Maury, and T. Somers. 2023. *Supply Chain Analysis and Material Demand Forecast in Strategic Technologies and Sectors in the EU - A Foresight Study*, JRC Science for Policy Report.
- Chapman, Bert. 2018. "The Geopolitics of Rare Earth Elements: Emerging Challenge for U.S. National Security and Economics." *Journal of Self-Governance and Management Economics* 6(2). doi: 10.22381/JSME6220182.
- Charpentier Poncelet, Alexandre, Philippe Loubet, Christoph Helbig, Antoine Beylot, Stéphanie Muller, Jacques Villeneuve, Bertrand Laratte, Andrea Thorenz, Axel Tuma, and Guido Sonnemann. 2022. "Midpoint and Endpoint Characterization Factors for Mineral Resource Dissipation: Methods and Application to 6000 Data Sets." *International Journal of Life Cycle Assessment* 27(9–11). doi: 10.1007/s11367-022-02093-2.
- Chellini, E., Maurello, M. T., & Cortini, B. (2017). Human bio-monitoring study around a plant that recycles and refines precious metals in Central Italy. *Science of the Total Environment*(584-585), 348-354.
- Ciacci, L., Werner, T. T., Vassura, I., & F, P. (2019). Backlighting the European Indium Recycling Potentials. *Journal of Industrial Ecology*, 23(2), 426-437.
- Ciccu, R., and G. Costa. 2011. "Recycling of Secondary Raw Materials from End-of-Life Car Tires." *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 155:1115–26. doi: 10.2495/SC120932.
- Cimprich, A., Bach, V., Helbig, C., Thorenz, A., Schrijvers, D., Sonnemann, G., . . . Berger, M. (2019). Raw material criticality assessment as a complement to environmental life cycle assessment: Examining methods for product-level supply risk assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 23(5), 1226-1236.
- Cimprich, A., K. S. Karim, and S. B. Young. 2018. "Extending the Geopolitical Supply Risk Method: Material 'Substitutability' Indicators Applied to Electric Vehicles and Dental X-Ray Equipment." *International Journal of Life Cycle Assessment* 23(10):2024–42. doi: 10.1007/s11367-017-1418-4.
- Cimprich, A., S. B. Young, C. Helbig, E. D. Gemechu, A. Thorenz, A. Tuma, and G. Sonnemann. 2017. "Extension of Geopolitical Supply Risk Methodology: Characterization Model Applied to Conventional and Electric Vehicles." *Journal of Cleaner Production* 162:754–63. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.063.

- CLIMA. (2020, Dicembre 4). *2050 long-term strategy*. Tratto da Climate Action: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en
- Commissione europea. (2008). *L'iniziativa "materie prime": rispondere ai nostri bisogni fondamentali per garantire la crescita e creare posti di lavoro in Europa*. Bruxelles: Ufficio delle pubblicazioni dell'Unione europea.
- Commissione europea. (2011, Febbraio 2). *Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni: affrontare le sfide relative ai mercati dei prodotti di base e alle materie prime*. Tratto da EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52011DC0025>
- Commissione europea. (2020a, Marzo 11). *Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni - Un nuovo piano d'azione per l'economia circolare: per un'Europa più pulita e più competitiva*. Tratto da EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0098>
- Commissione europea. (2020b, Settembre 3). *Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni – Resilienza delle materie prime critiche: tracciare un percorso verso una maggiore sicurezza e sostenibilità*. Tratto da EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0474>
- Commissione europea. (2020c). *Study on the EU's list of critical raw materials (2020) – Final report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Tratto da Publications Office of the European Union.
- Commissione europea. (2020d, Marzo 10). *Comunicazione della commissione al parlamento europeo, al consiglio europeo, al consiglio, al comitato economico e sociale europeo e al comitato delle regioni: una nuova strategia industriale per l'Europa*. Tratto da EUR-lex: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0102>
- Commissione europea. (2023a, Marzo 16). *Proposta di Regolamento del Parlamento europeo e del Consiglio che istituisce un quadro atto a garantire un approvvigionamento sicuro e sostenibile di materie prime critiche e che modifica i regolamenti (UE) n. 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724*. Tratto da EUR-Lex: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:903d35cc-c4a2-11ed-a05c-01aa75ed71a1.0021.02/DOC_1&format=PDF
- Consiglio dell'Unione europea. (2022, Aprile 8). *Regolamento (UE) 2022/576 del Consiglio dell'8 aprile 2022 che modifica il regolamento (UE) n. 833/2014 concernente misure restrittive in*

considerazione delle azioni della Russia che destabilizzano la situazione in Ucraina. Tratto da EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32022R0576>

DG COMM. (2020a, Dicembre 18). *European Commission*. Tratto da The European Green Deal: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

DG COMM. (2021, Febbraio 18). *Questions and Answers: An open, sustainable and assertive trade policy*. Tratto da European Commission: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_21_645

DG GROW. (2023, Dicembre 13). *Critical raw materials*. Tratto da Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en

Di Iaconi, C., M. Pagano, R. Ramadori, and A. Lopez. 2010. "Nitrogen Recovery from a Stabilized Municipal Landfill Leachate." *Bioresource Technology* 101(6):1732–36. doi: 10.1016/j.biortech.2009.10.013.

Di Lonardo, M. C., E. Binner, and F. Lombardi. 2015. "Influence Assessment of a Lab-Scale Ripening Process on the Quality of Mechanically-Biologically Treated MSW for Possible Recovery." *Waste Management* 43:50–60. doi: 10.1016/j.wasman.2015.05.028.

Djurica, M. (2022, Aprile 4). *Zelenskiy says Russian 'war crimes' in Ukraine make negotiations harder*. Tratto da Reuters: <https://www.reuters.com/world/europe/ukraines-president-says-russian-actions-ukraine-make-negotiations-harder-2022-04-04/>

Dong, S., Ochoa Gonzalez, R., & Harrison, R. M. (2017). Isotopic signatures suggest important contributions from recycled gasoline, road dust and non-exhaust traffic sources for copper, zinc and lead in PM10 in London, United Kingdom. *Atmospheric Environment*(165), 88-98.

Duda, A. E., & Valverde, G. F. (2021). The economics of coking coal mining: A fossil fuel still needed for steel production. *Energies*, 14(22), 7682.

Dupont, D., Arnout, S., Jones, P. T., & Binnemans, K. (2016). Antimony Recovery from End-of-Life Products and Industrial Process Residues: A Critical Review. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2(1), 79-103.

Eggert, Roderick, Cyrus Wadia, Corby Anderson, Diana Bauer, Fletcher Fields, Lawrence Meinert, and Patrick Taylor. 2016. "Rare Earths: Market Disruption, Innovation,

- and Global Supply Chains.” *Annual Review of Environment and Resources* 41. doi: 10.1146/annurev-environ-110615-085700.
- EIT RawMaterials. (2020, Novembre 20). *European Raw Materials Alliance*. Tratto da European Raw Materials Alliance: <https://erma.eu/>
- Esculier, F., & Barles, S. (2021). *Past and Future Trajectories of Human Excreta Management Systems: Paris in the Nineteenth to Twenty-First Centuries* (Vol. 90).
- Esculier, F., J. Le Noë, S. Barles, G. Billen, B. Créno, J. Garnier, J. Lesavre, L. Petit, and J. P. Tabuchi. 2019. “The Biogeochemical Imprint of Human Metabolism in Paris Megacity: A Regionalized Analysis of a Water-Agro-Food System.” *Journal of Hydrology* 573:1028–45. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.02.043.
- Esposito, F., Nardone, A., & Fasano, E. (2018). A systematic risk characterization related to the dietary exposure of the population to potentially toxic elements through the ingestion of fruit and vegetables from a potentially contaminated area. A case study: The issue of the “Land of Fires” area. *Environmental Pollution*(243), 1781-1790.
- European Commission: Enterprise and Industry. 2010. “Critical Raw Materials for the EU, Report of the Ad-Hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials.” *Eurocom* 39(July).
- European Commission Directorate-General for Communication. 2020. *Circular Economy Action Plan: For a Cleaner and More Competitive Europe*.
- European Commission. 2014. “Communication from the Commission: On the Review of the List of Critical Raw Materials for the EU and the Implementation of the Raw Materials Initiative.” *European Commission: Brussels, Belgium*.
- European Commission. 2017a. “Communication from the Commission: On the 2017 List of Critical Raw Materials for the EU.” *European Commission: Brussels, Belgium*.
- European Commission. 2017b. “Methodology for Establishing the EU List of Critical Raw Materials.” *Publications Office of the European Union*.
- European Commission. 2018. *Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy*.
- European Commission. 2023. *Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 Final Report*.
- EUROSTAT. (2023, Dicembre 21). *Database on international trade in goods*. Tratto da Eurostat: <https://ec.europa.eu/eurostat/comext/newxtweb/>

- Executive Office of the President. (2019, Luglio 25). *Presidential Determination Pursuant to Section 303 of the Defense Production Act of 1950, as Amended*. Tratto da Federal Register: <https://www.federalregister.gov/documents/2019/07/25/2019-15994/presidential-determination-pursuant-to-section-303-of-the-defense-production-act-of-1950-as-amended>
- Ferro, P., & Bonollo, F. (2019). Design for recycling in a critical raw materials perspective. *Recycling*, 4(4), 44.
- Ferro, P., Bonollo, F., & Cruz, S. A. (2020). Alloy substitution in a critical raw materials perspective. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 14(51), 81-91.
- Fink, A. (2013). *Conducting research literature reviews: From the internet to paper*. Los Angeles: Sage Publications.
- Franus, W., Wiatros-Motyka, M. M., & Wdowin, M. (2015). Coal fly ash as a resource for rare earth elements. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(2), 9464-9474.
- Fuyuno, Ichiko. 2012. "Japan and Vietnam Join Forces to Exploit Rare-Earth Elements." *Nature*. doi: 10.1038/nature.2012.11009.
- Galanda, D., P. Rajec, L. Mátel, O. Roskopfová, and S. Dulanská. 2009. "Separation Techniques for Quantification of Radionuclides in Environmental Samples." *TheScientificWorldJournal* 9:1206–14. doi: 10.1100/tsw.2009.124.
- Ganguli, Rajive, and Douglas R. Cook. 2018. "Rare Earths: A Review of the Landscape." *MRS Energy and Sustainability* 5(1).
- Gauß, R., C. Gellermann, and A. Maurer. 2023. *Raw Material Demands for the Green Transition: Risks, Opportunities, and Required Actions to Meet the 2030 Climate Targets*. Vol. 65.
- Gemechu, E. D., C. Helbig, G. Sonnemann, A. Thorenz, and A. Tuma. 2016. "Import-Based Indicator for the Geopolitical Supply Risk of Raw Materials in Life Cycle Sustainability Assessments." *Journal of Industrial Ecology* 20(1):154–65. doi: 10.1111/jiec.12279.
- Gergoric, M., Barrier, A., & Retegan, T. (2019). Recovery of Rare-Earth Elements from Neodymium Magnet Waste Using Glycolic, Maleic, and Ascorbic Acids Followed by Solvent Extraction. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 5(1), 85-96.
- Gholz, E. (2014, Ottobre 17). *Rare Earth Elements and National Security*. Tratto da Council on Foreign Relations: <https://www.cfr.org/report/rare-earth-elements-and-national-security>

- Giannuli, A. (2014, Agosto 6). Non solo gas: alla caccia delle terre rare. *Limes*, p. 169-176.
- Gonzalez, A. G., Wang, D., Dubus, J.-M., & Omand Rasmussen, P. (2020). Design and experimental investigation of a hybrid rotor permanent magnet modular machine with 3D flux paths accounting for recyclability of permanent magnet material. *Energies*, 16(3), 1342.
- Gorman, S. (2009, Agosto 31). *California mine digs in for "green" gold rush*. Tratto da Reuters: <https://www.reuters.com/article/us-mining/california-mine-digs-in-for-green-gold-rush-idUSTRE57U02I20090831/>
- Graedel, T. E., Rachel Barr, Chelsea Chandler, Thomas Chase, Joanne Choi, Lee Christoffersen, Elizabeth Friedlander, Claire Henly, Christine Jun, Nedal T. Nassar, Daniel Schechner, Simon Warren, Man Yu Yang, and Charles Zhu. 2012. "Methodology of Metal Criticality Determination." *Environmental Science and Technology* 46(2). doi: 10.1021/es203534z.
- Grohol, M., & Veeh, C. (2023). *Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Gschneidner, K. a., J. Capellen, and Mel Tecotzky. 1987. "1787 -1987 Two Hundred Years of Rare Earth." *Rare-Earth Information Center*.
- Guéguen, F., Stille, P., & Millet, M. (2011). Air quality assessment by tree bark biomonitoring in urban, industrial and rural environments of the Rhine Valley: PCDD/Fs, PCBs and trace metal evidence. *Chemosphere*, 85(2), 195-202.
- Haberl, J., Koralewska, R., & Schlumberger, S. (2018). Quantification of main and trace metal components in the fly ash of waste-to-energy plants located in Germany and Switzerland: An overview and comparison of concentration fluctuations within and between several plants. *Waste Management*, 75, 361-371.
- Habib, K., L. Hamelin, and H. Wenzel. 2016. "A Dynamic Perspective of the Geopolitical Supply Risk of Metals." *Journal of Cleaner Production* 133:850–58. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.05.118.
- Habib, K., S. T. Hansdóttir, and H. Habib. 2020. "Critical Metals for Electromobility: Global Demand Scenarios for Passenger Vehicles, 2015–2050." *Resources, Conservation and Recycling* 154. doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104603.
- Haddaway, N., Woodcock, P., Macura, B., & al., e. (2015). Making literature reviews more reliable through application of lessons from systematic reviews. *Conservation Biology*, 29(6), 1596-1605.

- Hao, H., Z. Ma, A. Wang, W. Xing, H. Song, P. Zhao, J. Wei, and S. Zheng. 2023. “Modeling and Assessing the Robustness of the Lithium Global Trade System against Cascading Failures.” *Resources Policy* 85. doi: 10.1016/j.resourpol.2023.103822.
- Heinrich, M. A., & Lang, W. (2019). Capture and Control of Material Flows and Stocks in Urban Residential Buildings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 225(1), 012001.
- Helbig, C., E. D. Gemechu, B. Pillain, S. B. Young, A. Thorenz, A. Tuma, and G. Sonnemann. 2016. “Extending the Geopolitical Supply Risk Indicator: Application of Life Cycle Sustainability Assessment to the Petrochemical Supply Chain of Polyacrylonitrile-Based Carbon Fibers.” *Journal of Cleaner Production* 137:1170–78. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.214.
- Hool, A., C. Helbig, and G. Wierink. 2023. “Challenges and Opportunities of the European Critical Raw Materials Act.” *Mineral Economics*. doi: 10.1007/s13563-023-00394-y.
- Hörtenhuber, S. J., M. C. Theurl, and K. Möller. 2019. “Comparison of the Environmental Performance of Different Treatment Scenarios for the Main Phosphorus Recycling Sources.” *Renewable Agriculture and Food Systems* 34(4):349–62. doi: 10.1017/S1742170517000515.
- Il Sole 24 Ore. (2010, Novembre 6). *Appello degli industriali sulle terre rare*. Tratto da Il Sole 24 Ore: https://st.ilsole24ore.com/art/finanza-e-mercati/2010-11-06/appello-industriali-terre-rare-064240.shtml?uuid=AYYFTOhC&refresh_ce=1
- Jamasmie, C. (2015, Ottobre 30). *Japan tightens grip on Kazakhstan’s emerging rare earths sector*. Tratto da Mining.com: <http://www.mining.com/japan-tightens-grip-on-kazakhstans-emerging-rare-earths-sector/>
- Jamasmie, C. (2016, Febbraio 2). *China gets tougher on illegal mining, exporting of rare earths*. Tratto da Mining.com: <https://www.mining.com/china-gets-tougher-on-illegal-mining-exporting-of-rare-earths/>
- Jimenez-Relinque, E., Grande, M., & Duran, T. (2020). Environmental impact of nano-functionalized construction materials: leaching of titanium and nitrates from photocatalytic pavements under outdoor conditions. *Science of the Total Environment*(744), 140817.
- Jin, H., & Park, J. (2011, Marzo 11). *Japanese, Korean firms in \$1.8 billion deal for Brazil firm*. Tratto da Reuter: <https://www.reuters.com/article/us-posco-cbmm/japanese-korean-firms-in-1-8-billion-deal-for-brazil-firm-idUSTRE7220EQ20110303>

- Joint Research Centre. (2023, Dicembre 14). *RMIS – Raw Materials Information System*. Tratto da RMIS – Raw Materials Information System: <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/>
- Kalmykova, Y., and K. Karlfeldt Fedje. 2013. “Phosphorus Recovery from Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash.” *Waste Management* 33(6):1403–10. doi: 10.1016/j.wasman.2013.01.040.
- Kalmykova, Y., R. Harder, H. Borgstedt, and I. Svanäng. 2012. “Pathways and Management of Phosphorus in Urban Areas.” *Journal of Industrial Ecology* 16(6):928–39. doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00541.x.
- Kelderman, P., Koech, D., Gumbo, B., & O’Keeffe, J. (2009). *Phosphorus budget in the low-income, peri-urban area of Kibera in Nairobi (Kenya)* (Vol. 60).
- Kennedy, James C. 2015. “Rare Earth Production, Regulatory USA/International Constraints and Chinese Dominance: The Economic Viability Is Bounded by Geochemistry and Value Chain Integration.” in *Rare Earths Industry: Technological, Economic, and Environmental Implications*.
- King, A. (2017). *Annual Report*. Ames: Critical Materials Institute.
- Klinger, Julie Michelle. 2018. “Rare Earth Elements: Development, Sustainability and Policy Issues.” *Extractive Industries and Society* 5(1). doi: 10.1016/j.exis.2017.12.016.
- Klossek, Polina, Jakob Kullik, and Karl Gerald van den Boogaart. 2016. “A Systemic Approach to the Problems of the Rare Earth Market.” *Resources Policy* 50. doi: 10.1016/j.resourpol.2016.09.005.
- Koyamparambath, A., J. Santillán-Saldivar, B. McLellan, and G. Sonnemann. 2022. “Supply Risk Evolution of Raw Materials for Batteries and Fossil Fuels for Selected OECD Countries (2000–2018).” *Resources Policy* 75. doi: 10.1016/j.resourpol.2021.102465.
- Koyamparambath, A., Santillán-Saldivar, J., McLellan, B., & Sonnemann, G. (2022). Supply risk evolution of raw materials for batteries and fossil fuels for selected OECD countries (2000–2018). *Resources Policy*, 75, 102465.
- Krugman, P. (2010, Ottobre 17). *Rare and Foolish*. Tratto da The New York Times: <https://www.nytimes.com/2010/10/18/opinion/18krugman.html>
- Kulikowska, D., & Klimiuk, E. (2008). The effect of landfill age on municipal leachate composition. *Bioresource Technology*, 99(13), 5981-5985.

- Kupiec, M., Pieńkowski, P., & Bosiacka, B. (2019). Old and new threats – trace metals and fluoride contamination in soils at Defunct Smithy sites. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(5), 819.
- Lam, K. L., L. Zlatanović, and J. P. van der Hoek. 2020. “Life Cycle Assessment of Nutrient Recycling from Wastewater: A Critical Review.” *Water Research* 173. doi: 10.1016/j.watres.2020.115519.
- Larsen, T., Maurer, M., Udert, K., & Lienert, J. (2007). *Nutrient cycles and resource management: Implications for the choice of wastewater treatment technology* (Vol. 56).
- Lavtizar, V., Igor, K., Ladeja, G., Mojca, B., & Polonca, T. (2021). *A Transition Towards the Circular Economy in Slovenia*.
- Lederer, J., Kleemann, F., & Ossberger, R. (2016). Prospecting and Exploring Anthropogenic Resource Deposits: The Case Study of Vienna's Subway Network. *Journal of Industrial Ecology*, 20(6), 1320-1333.
- Leonard, M., J. P.-F., Shapiro, J., Tagliapietra, S. E., & Wolf, G. (2021). The geopolitics of the European Green Deal. *International Organisations Research Journal*, 16(2), 204-235.
- Lerner, A. P. 1934. “The Concept of Monopoly and the Measurement of Monopoly Power.” *Review of Economic Studies* 1(3). doi: 10.2307/2967480.
- Liffey, K., & Oatis, J. (2022, Aprile 7). *Russia says Ukraine presented 'unacceptable' draft peace deal*. Tratto da Reuters: <https://www.reuters.com/world/europe/russia-says-ukraine-presented-unacceptable-draft-peace-deal-2022-04-07/>
- Long, Keith R., Bradley S. Van Gosen, Nora K. Foley, and Daniel Cordier. 2012. “The Principal Rare Earth Elements Deposits of the United States: A Summary of Domestic Deposits and a Global Perspective.” in *Non-Renewable Resource Issues: Geoscientific and Societal Challenges*.
- Mackenzie, R. (2014, Settembre 15). *Rostekb tries to get help for gas from the President for rare earth metals*. Tratto da Russia Oil and Gas, Metals and Mining News: <http://www.rusmininfo.com/news/15-09-2014/rostekh-tries-get-help-gas-president-rare-earth-metals>
- Marceau, G. (2016). WTO and Export Restrictions. *Journal of World Trade*, 50(4), 563–586.
- Morée, A. L., Beusen, A. H., & Bouwman, A. F. (2013). Exploring global nitrogen and phosphorus flows in urban wastes during the twentieth century. *Global Biogeochemical Cycles*, 27(3), 836-846.

- Morozova, A. G., T. M. Lonzing, V. A. Skotnikov, J. N. Sahu, G. G. Mikhailov, J. L. Schenk, A. Bhattacharyya, and Y. Kapelyushin. 2020. "Utilization of Metallurgical Slag with Presence of Novel $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ as a Composite Sorbent for Wastewater Treatment Contaminated by Cerium." *Journal of Cleaner Production* 255. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120286.
- Mostert, C., Sameer, H., & Glanz, D. (2020). Urban Mining for Sustainable Cities: Environmental Assessment of Recycled Concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 588(5), 052021.
- Nedelciu, C. E., K. V. Ragnarsdóttir, and I. Stjernquist. 2019. "From Waste to Resource: A Systems Dynamics and Stakeholder Analysis of Phosphorus Recycling from Municipal Wastewater in Europe." *Ambio* 48(7):741–51. doi: 10.1007/s13280-018-1097-9.
- Nehls, T., C. Schwartz, K. H. J. Kim, M. Kaupenjohann, G. Wessolek, and J. L. Morel. 2015. "Letter to the Editors: Phyto-P-Mining—Secondary Urban Green Recycles Phosphorus from Soils Constructed of Urban Wastes." *Journal of Soils and Sediments* 15(8):1667–74. doi: 10.1007/s11368-014-1023-0.
- Neset, T. S. S., J. O. Drangert, H. P. Bader, and R. Scheidegger. 2010. "Recycling of Phosphorus in Urban Sweden: A Historical Overview to Guide a Strategy for the Future." *Water Policy* 12(4):611–24. doi: 10.2166/wp.2009.165.
- Nguyen, Ruby Thuy, and D. Devin Imholte. 2016. "China's Rare Earth Supply Chain: Illegal Production, and Response to New Cerium Demand." *JOM* 68(7). doi: 10.1007/s11837-016-1894-1.
- Nowakowski, P., K. Szwar, and U. Boryczka. 2020. "Combining an Artificial Intelligence Algorithm and a Novel Vehicle for Sustainable E-Waste Collection." *Science of the Total Environment* 730. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138726.
- OECD. (2023, Dicembre 15). *Trade in raw materials*. Tratto da Organisation for Economic Co-operation and Development: <https://www.oecd.org/trade/topics/trade-in-raw-materials/>
- Okabe, Toru H. 2017. "Bottlenecks in Rare Metal Supply and the Importance of Recycling—a Japanese Perspective." *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy* 126(1–2). doi: 10.1080/03719553.2016.1268855.
- Oliver-Tomas, B., M. Hitzl, M. Owsianiak, and M. Renz. 2019. "Evaluation of Hydrothermal Carbonization in Urban Mining for the Recovery of Phosphorus from the

Organic Fraction of Municipal Solid Waste.” *Resources, Conservation and Recycling* 147:111–18. doi: 10.1016/j.resconrec.2019.04.023.

- Paat, A., Veetil, S. K., Karu, V., & Hitch, M. (2021). Evaluating the potential of Estonia as European REE recycling capital via an environmental social governance risks assessment model. *Extractive Industries and Society*, 8(4), 100767.
- Papaioannou, D., Koukoulakis, P. H., & Lambropoulou, D. (2019). The dynamics of the pharmaceutical and personal care product interactive capacity under the effect of artificial enrichment of soil with heavy metals and of wastewater reuse. *Science of the Total Environment*(662), 537-546.
- Paridaens, J., & Vanmarcke, H. (2008). Radiological impact of almost a century of phosphate industry in Flanders, Belgium. *Health Physics*, 95(4), 413-424.
- Paul, S., & Stanway, D. (2016, Febbraio 2). *China to boost crackdown on illegal rare earth mining*. Tratto da Reuters: <https://www.reuters.com/article/rareearths-china/china-to-boost-crackdown-on-illegal-rare-earth-mining-idUSL3N15D278/>
- Pillain, B., E. Gemechu, and G. Sonnemann. 2017. “Identification of Key Sustainability Performance Indicators and Related Assessment Methods for the Carbon Fiber Recycling Sector.” *Ecological Indicators* 72:833–47. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.08.056.
- Ragonnaud, G. (2023, Dicembre 7). *Critical raw materials act*. Tratto da Think Tank European Parliament: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/754638/EPRS_ATA\(2023\)754638_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/754638/EPRS_ATA(2023)754638_EN.pdf)
- Ramdhani, A., Ramdhani, M. A., & Amin, A. S. (2014). Writing a literature review research paper: A step-by-step approach. *International Journal of Basic and Applied Sciences*, 3 (1), 47-56.
- Rare Element Resources Ltd. (s.d.). *Bear Lodge Project Overview*. Tratto da Rare Element Resources: <https://www.rareelementresources.com/bear-lodge-project/overview#.XE42jVxKjid>
- Reichl, C., Schatz, M., & Masopust, A. (2023). *World Mining Data 2023*. Vienna: Federal Ministry of Finance.
- Renzulli, P. A., Notarnicola, B., & Tassielli, G. (2016). Life cycle assessment of steel produced in an Italian integrated steel mill. *Sustainability (Switzerland)*, 8(8), 719.

- Riesgo García, María Victoria, Alicja Krzemień, Miguel Ángel Manzanedo del Campo, Mario Menéndez Álvarez, and Malcolm Richard Gent. 2017. "Rare Earth Elements Mining Investment: It Is Not All about China." *Resources Policy* 53. doi: 10.1016/j.resourpol.2017.05.004.
- Rocchetti, L., A. Amato, V. Fonti, S. Ubaldini, I. De Michelis, B. Kopacek, F. Vegliò, and F. Beolchini. 2015. "Cross-Current Leaching of Indium from End-of-Life LCD Panels." *Waste Management* 42:180–87. doi: 10.1016/j.wasman.2015.04.035.
- Romano, P., S. Rahmati, R. Adavodi, I. Birloaga, and F. Vegliò. 2023. "Leaching of Rare Earth Elements from Permanent Magnet Swarf in Citric Acid: Effects of Acid Concentration on Extraction Kinetics." *Metals* 13(11). doi: 10.3390/met13111801.
- Rosario-Beltré, A. J., J. Sánchez-España, V. Rodríguez-Gómez, F. J. Fernández-Naranjo, E. Bellido-Martín, P. Adánez-Sanjuán, and J. C. Arranz-González. 2023. "Critical Raw Materials Recovery Potential from Spanish Mine Wastes: A National-Scale Preliminary Assessment." *Journal of Cleaner Production* 407. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137163.
- Rovira, J., Nadal, M., & Schuhmacher, M. (2018). Concentrations of trace elements and PCDD/Fs around a municipal solid waste incinerator in Girona (Catalonia, Spain). Human health risks for the population living in the neighborhood. *Science of the Total Environment*(630), 34-45.
- Rufí-Salís, M., N. Brunnhofer, A. Petit-Boix, X. Gabarrell, A. Guisasola, and G. Villalba. 2020. "Can Wastewater Feed Cities? Determining the Feasibility and Environmental Burdens of Struvite Recovery and Reuse for Urban Regions." *Science of the Total Environment* 737. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139783.
- Santillán-Saldivar, J., A. Cimprich, N. Shaikh, B. Laratte, S. B. Young, and G. Sonnemann. 2021. "How Recycling Mitigates Supply Risks of Critical Raw Materials: Extension of the Geopolitical Supply Risk Methodology Applied to Information and Communication Technologies in the European Union." *Resources, Conservation and Recycling* 164. doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105108.
- Santillán-Saldivar, J., Cimprich, A., Shaikh, N., Laratte, B., Young, S. B., & Sonnemann, G. (2021). How recycling mitigates supply risks of critical raw materials: Extension of the geopolitical supply risk methodology applied to information and communication technologies in the European Union. *Resources, Conservation and Recycling*, 164, 105108.
- Santillán-Saldivar, J., E. Gemechu, S. Muller, J. Villeneuve, S. B. Young, and G. Sonnemann. 2022. "An Improved Resource Midpoint Characterization Method for

- Supply Risk of Resources: Integrated Assessment of Li-Ion Batteries.” *International Journal of Life Cycle Assessment* 27(3):457–68. doi: 10.1007/s11367-022-02027-y.
- Santillán-Saldivar, J., T. Gaugler, C. Helbig, A. Rathgeber, G. Sonnemann, A. Thorenz, and A. Tuma. 2021. “Design of an Endpoint Indicator for Mineral Resource Supply Risks in Life Cycle Sustainability Assessment: The Case of Li-Ion Batteries.” *Journal of Industrial Ecology* 25(4):1051–62. doi: 10.1111/jiec.13094.
- Schneider, Laura, Markus Berger, Eckhard Schüler-Hainsch, Sven Knöfel, Klaus Ruhland, Jörg Mosig, Vanessa Bach, and Matthias Finkbeiner. 2014. “The Economic Resource Scarcity Potential (ESP) for Evaluating Resource Use Based on Life Cycle Assessment.” *International Journal of Life Cycle Assessment* 19(3). doi: 10.1007/s11367-013-0666-1.
- Schreck, E., Foucault, Y., & Sarret, G. (2012). Metal and metalloid foliar uptake by various plant species exposed to atmospheric industrial fallout: Mechanisms involved for lead. *Science of the Total Environment*(427-428), 253-262.
- SCRREEN2 Project. (2023, Agosto 4). *PGMs*. Tratto da CRMs 2023: https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/08/SCRREEN2_factsheets_PGM.pdf
- SCRREEN2 Project. (2023a, Agosto 4). *Platinum Group Metals*. Tratto da CRMs 2023: https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/08/SCRREEN2_factsheets_PGM.pdf
- SCRREEN2 Project. (2023b, Settembre 8). *Gallium*. Tratto da CRMs 2023: https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/09/SCRREEN2_factsheets_GALLIUM.pdf
- SCRREEN2 Project. (2023c, Agosto 25). *Magnesium*. Tratto da CRMs 2023: https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/08/SCRREEN2_factsheets_MAGNESIUM.pdf
- SCRREEN2 Project. (2023d, Settembre 15). *Germanium*. Tratto da CRMs 2023: https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/09/SCRREEN2_factsheets_GERMANIUM-1.pdf
- SCRREEN2 Project. (2023e, Dicembre 15). *Tungsten*. Tratto da CRMs 2023: https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/12/SCRREEN2_factsheets_TUNGSTEN-update.pdf

- SCRREEN2 Project. (2023f, Agosto 4). *Rare Earth Elements*. Tratto da CRMs 2023: https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/08/SCRREEN2_factsheets_REE-EUROSTAT.pdf
- SCRREEN2 Project. (2023g, Dicembre 1). *Bismuth*. Tratto da CRMs 2023: https://screen.eu/wp-content/uploads/2023/12/SCRREEN2_factsheets_BISMUTH_V1.pdf
- Sharifi, A., & Khavarian-Garmsir, A. R. (2020). The COVID-19 pandemic: Impacts on cities and major lessons for urban planning, design, and management. *Science of The Total Environment*(749), 1-14.
- Siddhantakar, A., J. Santillán-Saldivar, T. Kippes, G. Sonnemann, A. Reller, and S. B. Young. 2023. “Helium Resource Global Supply and Demand: Geopolitical Supply Risk Analysis.” *Resources, Conservation and Recycling* 193. doi: 10.1016/j.rescon-rec.2023.106935.
- Sievers, H., & Schuster, M. (2015). *Long-term monitoring of palladium and platinum contents in road dust of the city of Munich, Germany*.
- Sievers, H., & Schuster, M. (2015). Long-Term Monitoring of Palladium and Platinum Contents in Road Dust of the City of Munich, Germany. In F. Zereini, & C. Wiseman, *Platinum Metals in the Environment. Environmental Science and Engineering* (p. 187-198). Berlin: Springer.
- Skorobilowicz, E. (2007). The influence of local sources of pollution on chromium, nickel, copper and cobalt in sediments of some river basins of the upper Narew. *Environmental Engineering – Proceedings of the 2nd National Congress of Environmental Engineering* (p. 427-430). Lublin: Routledge.
- Šorša, A., Miler, M., & Gosar, M. (2018). Follow-up geochemical studies and mineralogical investigations by scanning electron microscopy/energy dispersive spectroscopy (SEM/EDS) of soil samples from the industrial zone of Sisak, Croatia. *Journal of Geochemical Exploration*(187), 168-183.
- Speak, A., F. J. Escobedo, A. Russo, and S. Zerbe. 2020. “Total Urban Tree Carbon Storage and Waste Management Emissions Estimated Using a Combination of LiDAR, Field Measurements and an End-of-Life Wood Approach.” *Journal of Cleaner Production* 256. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120420.
- Sperlrich, A., Zheng, X., Ernst, M., & Jekel, M. (2008). *An integrated wastewater reuse concept combining natural reclamation techniques, membrane filtration and metal oxide adsorption* (Vol. 57).

- Statista Research Department. (2023, Ottobre 30). *Demand for rare earth oxides worldwide by application 2019 & 2025*. Tratto da Statista: <https://www.statista.com/statistics/449722/rare-earth-estimated-demand-globally-by-application/>
- Sturini, M., E. Rivagli, F. Maraschi, A. Speltini, A. Profumo, and A. Albini. 2013. "Photocatalytic Reduction of Vanadium(V) in TiO₂ Suspension: Chemo-metric Optimization and Application to Wastewaters." *Journal of Hazardous Materials* 254–255(1):179–84. doi: 10.1016/j.jhazmat.2013.03.045.
- Szczepański, M. (2020). *Critical raw materials for the EU Enablers of the green and digital recovery*. Brussels: European Parliamentary Research Service.
- Szczepański, M. (2021). *Critical raw materials in EU external policies: Improving access and raising global standards*. Brussels: European Parliamentary Research Service.
- Talens Peiró, L., A. Castro Girón, and X. Gabarrell i Durany. 2020. "Examining the Feasibility of the Urban Mining of Hard Disk Drives." *Journal of Cleaner Production* 248. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119216.
- The European Commission. 2018. "Critical Raw Materials - European Commission." *The European Commission*.
- Theodosopoulos, V. (2020, Luglio 6). *The Geopolitics of Supply: towards a new EU approach to the security of supply of critical raw materials?* Tratto da Brussels School of Governance: <https://brussels-school.be/research/publications/geopolitics-supply-towards-new-eu-approach-security-supply-critical-raw>
- Ting, M. H. (2010, Novembre 11). *China and the supply chain of rare metals: Table of [dis]contents*. Tratto da East Asia Forum: <https://www.eastasiaforum.org/2010/11/11/china-and-the-supply-chain-of-rare-metals-table-of-discontents/>
- Tkaczyk, A. H., Bartl, A., Amato, A., Lapkovskis, V., & Petranikova, M. (2018). Sustainability evaluation of essential critical raw materials: Cobalt, niobium, tungsten and rare earth elements. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(20), 203001.
- Topf, A. (2017, Giugno 16). *Mountain Pass sells for \$20.5 million*. Tratto da Mining.com: <https://www.mining.com/mountain-pass-sells-20-5-million/>
- Touze, S., Guignot, S., & Hubau, A. (2020). Sampling waste printed circuit boards: Achieving the right combination between particle size and sample mass to measure metal content. *Waste Management*(118), 380-390.

- Transparency Market Research. (2022, Ottobre 15). *Transparency Market Research*. Tratto da Transparency Market Research:
<https://www.transparencymarketresearch.com/rare-earths.html>
- U. S. Department of the Interior. 2018. “Final List of Critical Minerals 2018.” *Federal Register* 83(97).
- U. S. Geological Survey (USGS). 2023a. *Mineral Commodity Summaries 2023: U.S. Geological Survey*.
- U. S. Geological Survey (USGS). 2023b. *Mineral Commodity Summaries 2023: U.S. Geological Survey*.
- UNCOMTRADE. 2022. “United Nations Commodity Trade Statistics Database.” *UN Comtrade (United Nations Commodity Trade Statistics Database)*.
- Ungaro, A. R. (2013). *Il mercato delle terre rare: aspetti politici e finanziari*. Roma: Istituto Affari Internazionali.
- US Gov. 2017. “A Federal Strategy To Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals.” *Presidential Documents* 82(246).
- USGS. 2002. “Rare Earth Elements-Critical Resources for High Technology SUPPORTING SOUND MANAGEMENT OF OUR MINERAL RESOURCES.” *USGS Fact Sheet* 087-02.
- USGS. 2020. *Mineral Commodity Summaries 2020, United States Geological Survey*.
- Van Eygen, E., De Meester, S., & Tran, H. P. (2016). Resource savings by urban mining: The case of desktop and laptop computers in Belgium. *Resources, Conservation and Recycling*(107), 53-64.
- Van Gosen, B. S., P. L. Verplanck, K. R. Long, J. Gambogi, R. R. Seal, and U. S. Department of the Interior. 2014. *The Rare-Earth Elements—Vital to Modern Technologies and Lifestyles: U.S. Geological Survey Fact Sheet*. Vol. 2.
- van Wieringen, K., & Fernández Álvarez, M. (2022). *Securing the EU's supply of critical raw materials*. Brussels, Luxembourg and Strasbourg: European Parliamentary Research Service.
- Vandecasteele, C., G. Wauters, S. Arickx, M. Jaspers, and T. Van Gerven. 2007. “Integrated Municipal Solid Waste Treatment Using a Grate Furnace Incinerator: The Indaver Case.” *Waste Management* 27(10):1366–75. doi: 10.1016/j.wasman.2006.08.005.

- Vassura, I., Morselli, L., & Bernardi, E. (2009). Chemical characterisation of spent rechargeable batteries. *Waste Management*, 29(8), 2332-2335.
- Wang, Liangshi, Xiaowei Huang, Ying Yu, Longsheng Zhao, Chunmei Wang, Zongyu Feng, Dali Cui, and Zhiqi Long. 2017. "Towards Cleaner Production of Rare Earth Elements from Bastnaesite in China." *Journal of Cleaner Production* 165.
- Wealth Daily. (2017, Dicembre 1). *Special report - Rare earth elements in 2016*. Tratto da Wealth Daily: <https://www.wealthdaily.com/rare-earth-elements-in-2016/>
- Wielemaker, R. C., J. Weijma, and G. Zeeman. 2018. "Harvest to Harvest: Recovering Nutrients with New Sanitation Systems for Reuse in Urban Agriculture." *Resources, Conservation and Recycling* 128:426–37. doi: 10.1016/j.resconrec.2016.09.015.
- Wielemaker, R., J. Stuiver, G. Zeeman, and J. Weijma. 2020. "Identifying Amsterdam's Nutrient Hotspots: A New Method to Map Human Excreta at Building and Neighborhood Scale." *Journal of Industrial Ecology* 24(3):473–84. doi: 10.1111/jiec.12962.
- World Bank. (2023, Dicembre 22). *GDP (current US\$)*. Tratto da The World Bank: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>
- World Trade Organization. (2020, Aprile 23). *WTO report finds growing number of export restrictions in response to COVID-19 crisis*. Tratto da World Trade Organization: https://www.wto.org/english/news_e/news20_e/rese_23apr20_e.htm
- World Trade Organization. 2017. "China - Measures Related to the Exportation of Rare Earths, Tungsten, and Molybdenum (WT/DS431, WT/DS432, WT/DS433): Reports of the Appellate Body." in *World Trade Organization*.
- Wu, J., D. Franzén, and M. E. Malmström. 2016. "Anthropogenic Phosphorus Flows under Different Scenarios for the City of Stockholm, Sweden." *Science of the Total Environment* 542:1094–1105. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.024.
- Wübbeke, Jost. 2013. "Rare Earth Elements in China: Policies and Narratives of Reinventing an Industry." *Resources Policy* 38(3). doi: 10.1016/j.resourpol.2013.05.005.
- Zabaleta, I., and L. Rodic. 2015. "Recovery of Essential Nutrients from Municipal Solid Waste - Impact of Waste Management Infrastructure and Governance Aspects." *Waste Management* 44:178–87. doi: 10.1016/j.wasman.2015.07.033.
- Zhang, Lu, Qing Guo, Junbiao Zhang, Yong Huang, and Tao Xiong. 2015. "Did China's Rare Earth Export Policies Work? - Empirical Evidence from USA and Japan." *Resources Policy* 43. doi: 10.1016/j.resourpol.2014.11.007.

- Zhang, S. E., J. E. Bourdeau, G. T. Nwaila, and Y. Ghorbani. 2023. “Emerging Criticality: Unraveling Shifting Dynamics of the EU’s Critical Raw Materials and Their Implications on Canada and South Africa.” *Resources Policy* 86. doi: 10.1016/j.resour-pol.2023.104247.
- Zhao, Y. Q., and Y. Yang. 2010. “Extending the Use of Dewatered Alum Sludge as a P-Trapping Material in Effluent Purification: Study on Two Separate Water Treatment Sludges.” *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering* 45(10):1234–39. doi: 10.1080/10934529.2010.493794.