



Università
Ca' Foscari
Venezia

Corso di Laurea magistrale

in Biotecnologie per l'ambiente e lo Sviluppo sostenibile

LM-8 Biotecnologie industriali

Tesi di Laurea

Valutazione predittiva di sostenibilità per scenari alternativi di gestione di terre e rocce da scavo

Relatrice

Ch.ma Prof.ssa Elena Semenzin

Correlatrice

Dott.ssa Silvia Breda, PhD

Laureanda

Linda Grotto

Matricola 887937

Anno Accademico 2021 / 2022

Sommario

1	ABSTRACT.....	9
2	MOTIVAZIONE	11
3	OBIETTIVI E STRUTTURA DELLA TESI.....	12
4	INTRODUZIONE	14
4.1	Cenni sull'attualità del principio di sviluppo sostenibile.....	26
4.2	Scenari di gestione dei materiali da scavo e quadro normativo di riferimento	30
4.2.1	Smaltimento in discarica	30
4.2.2	Preparazione per il riutilizzo (EoW).....	31
4.2.3	Riutilizzo come sottoprodotto.....	33
5	MATERIALI E METODI	35
5.1	Metodologia Life Cycle Assessment (LCA)	35
5.1.1	Definizione dell'LCA.....	35
5.1.2	Struttura	37
5.1.3	Fase 1: Definizione scopi ed obiettivi (Goal and Scope definition)	39
5.1.4	Fase 2: Analisi di inventario (Life Cycle Inventory).....	42
5.1.5	Fase 3: Valutazione degli impatti (Life Cycle Impact Assessment)	43
5.1.6	Fase 4: Interpretazione.....	44
5.2	Software e database LCA.....	45
5.2.1	Software SimaPro	45
5.2.2	Database Ecoinvent.....	46
5.3	Caso di studio.....	47
5.3.1	Descrizione del progetto	47
5.3.2	Geologia ed idrogeologia.....	51
5.3.3	Indagini pregresse	52
5.3.4	Volumetrie.....	54
5.3.5	Modellizzazione in SimaPro.....	55
5.3.5.1	Opzioni di gestione dei materiali di scavo	56
5.3.5.2	Opzioni di trasporto	59
5.3.5.3	Descrizione degli scenari di trasporto e gestione confrontati	60
6	RISULTATI.....	67
6.1	Life Cycle Assessment comparativa di scenari alternativi di gestione di terre e rocce da scavo	67
6.1.1	Definizione dell'obiettivo e campo d'applicazione	67

6.1.2	Analisi dell'inventario	71
6.1.3	Valutazione degli impatti.....	75
6.1.3.1	Confronto fra scenari di fine vita dei materiali da scavo	76
6.1.3.2	Confronto scenari A, B, C, D.....	80
7	DISCUSSIONE.....	88
8	CONCLUSIONI.....	90
9	BIBLIOGRAFIA.....	92
10	APPENDICE	95

Indice delle figure

Figura 1 - Logo SuRF Italy	19
Figura 2 - Livelli analisi indicatori di sostenibilità nelle bonifiche	20
Figura 3 - Generazione di rifiuti da attività economiche e famiglie, EU, 2020	22
Figura 4 - Trattamento rifiuti, EU, 2004-2020	23
Figura 5 - Trattamento rifiuti - recupero o smaltimento - EU, 2004-2020	24
Figura 6 - Sustainable Development Goals	27
Figura 7 - Modello delle 5P	28
Figura 8 - Primo framework LCA	37
Figura 7 - Struttura dell'LCA	38
Figura 10 - Fasi del ciclo di vita di un prodotto	40
Figura 11 - Scenario "From cradle to cradle"	41
Figura 12 - Tracciato galleria Tremezzina	48
Figura 13 - Tracciato galleria Tremezzina	50
Figura 14 - Trasporto scenario A Nord	61
Figura 15 - Trasporto scenario A Sud	61
Figura 16 - Trasporto scenario B Nord	62
Figura 17 - Trasporto scenario B Sud.....	63
Figura 18 - Trasporto scenario C Nord.....	64
Figura 19 - Trasporto scenario C Sud.....	64
Figura 20 - Trasporto scenario D Nord	65
Figura 21 - Trasporto scenario D Sud	66
Figura 22 – Confini del sistema.....	70
Figura 23 – Caratterizzazione a livello midpoint del confronto tra i possibili fine vita per le terre e rocce da scavo	77
Figura 24 – Caratterizzazione a livello midpoint dei contributi degli elementi che compongono la preparazione per il riutilizzo delle terre e rocce da scavo.....	78
Figura 25 – Caratterizzazione a livello midpoint dei contributi degli elementi che compongono il riutilizzo come sottoprodotto delle terre e rocce da scavo.....	79
Figura 26 – Caratterizzazione a livello midpoint dei risultati relativi al confronto tra i quattro scenari: A) smaltimento in discarica – trasporto via gomma, B)	

smaltimento in discarica – trasporto via lago e via gomma, C) preparazione per il riutilizzo, D) riutilizzo come sottoprodotto	82
Figura 27 – Caratterizzazione a livello midpoint dello scenario A: smaltimento in discarica – trasporto via gomma	84
Figura 28 – Caratterizzazione a livello midpoint dello scenario B: smaltimento in discarica – trasporto via lago e via gomma.....	85
Figura 29 – Caratterizzazione a livello midpoint dello scenario C: preparazione per il riutilizzo	86
Figura 30 – Caratterizzazione a livello midpoint dello scenario D: riutilizzo come sottoprodotto – trasporto via gomma	87

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Opere in sotterraneo	49
Tabella 2 - Opere a cielo aperto	49
Tabella 3 - Siti di cantierizzazione.....	49
Tabella 4 - Volumi totali in banco.....	54
Tabella 5 - Materiali da conferire ai siti di destinazione definitivi	55
Tabella 6 – Processi del database Ecoinvent.....	71
Tabella 7 - Dati di input	72
Tabella 8 – Dati di input trattamenti finali	72
Tabella 9 – Dati di input scenario A.....	73
Tabella 10 – Dati di input scenario B	73
Tabella 11 – Dati di input scenario C	74
Tabella 12 – Dati di input scenario D.....	74

1 Abstract

ITA

Lo studio condotto nell'ambito della tesi ha avuto lo scopo di operare una valutazione di sostenibilità ambientale comparativa di alternative di intervento per la gestione di materiali di risulta nell'ambito di un caso di studio affrontato durante il tirocinio presso la società di Ingegneria Nexteco s.r.l. Il progetto esaminato ha come obiettivo finale la costruzione di una galleria nei pressi del lago di Como che prevederà una movimentazione complessiva di circa 1342217 m³ di terre e rocce. In particolare, il focus è stato posto su una valutazione effettuata mediante analisi del ciclo di vita (LCA) relativa al destino dei materiali inerti scavati e sul loro trasporto; lo studio è stato svolto attraverso l'utilizzo del software SimaPro, e del database *Ecoinvent*.

In prima battuta, sono stati considerati singolarmente gli scenari di trasporto ai siti di destino, da un lato, e di trattamento e gestione finale, dall'altro, in modo da avere un quadro degli impatti ambientali circoscritto a questi due aspetti.

In seconda battuta, sono stati analizzati degli scenari completi di trasporto del materiale dal sito di scavo al sito di destino con relativo impatto legato alla gestione del fine vita. Tutte le ipotesi formulate sono conformi alla normativa di riferimento.

I risultati ottenuti consentono di ottenere informazioni particolarmente rilevanti in merito al contributo delle singole fasi di lavoro nel determinare gli impatti ambientali e possono essere di grande aiuto ai progettisti al fine di mettere a punto soluzioni di gestione il più sostenibili possibile.

Il lavoro svolto può rappresentare un punto di partenza importante anche per gli stakeholders al fine di supportare la riflessione sul tema della sostenibilità applicata alle grandi opere stradali a partire da dati di impatto ricavati in modo trasparente e scientificamente robusto.

ENG

The study, conducted during the thesis project, aimed to make an evaluation of comparative environmental sustainability of intervention alternatives for the management of waste materials in the context of a case study examined during the internship attended at the company “Nexteco Ingegneria srl.” The project concerned the construction of a tunnel near Lake Como which will involve an overall movement of approx. 1342217 m³ of soil and rocks. In particular, the focus was placed on the fate of inert materials excavated and their transport; the study was conducted using the SimaPro software and database *Ecoinvent*.

The project considered individually the transport scenarios to the destination sites and on the other hand the final treatment and management of materials, to have a picture of the environmental impacts limited to these two aspects. Secondly, the study analyzed together these two aspects resulting in four scenarios to compare. All the hypotheses formulated are compliant with the regulations of reference.

The results achieved allow to obtain particularly relevant information regarding the contribution of the individual work phases to determine the environmental impacts that can be of immense help to designers and decision makers, to develop management solutions that are as sustainable as possible.

The work conducted can also represent an important starting point for stakeholders to reflect on the issue of sustainability applied to major road works, starting from impact data obtained in a transparent and scientifically robust way.

2 Motivazione

La proposta del seguente progetto di tesi si inserisce nell'ambito dell'attività svolta durante il periodo di tirocinio presso lo studio Nexteco s.r.l., specializzato in diversi ambiti di applicazione dell'Ingegneria ambientale. Tale lavoro di tesi nasce dalla necessità di approfondire il tema della gestione sostenibile di terre e rocce da scavo. In questo senso è emersa la necessità di applicare una metodologia standardizzata ed approfondita, quale l'Analisi del Ciclo di Vita (*Life Cycle Assessment* - LCA), al fine di ottenere una valutazione della sostenibilità ambientale robusta e oggettiva.

Il confronto con esperti del settore ha portato alla definizione di uno specifico studio di sostenibilità relativo alla gestione di terre e rocce da scavo, nell'ambito del progetto "S.S. 340 "REGINA" – VARIANTE ALLA TREMEZZINA". Tale progetto riguarda lo scavo di una galleria nei pressi del lago di Como finalizzato alla diminuzione del traffico stradale sulla strada statale 340. Lo studio sulla gestione dei rifiuti provenienti dallo scavo, inoltre, appare particolarmente rilevante e attuale dal momento che i CDW (*Construction and Demolition Waste*) in Europa, secondo le più recenti statistiche datate 2020, rappresentavano la categoria di rifiuti più ingente ovvero il 37,1 % sul totale¹.

Il sistema analizzato presenta un elevato grado di complessità per via dei processi e delle variabili che lo costituiscono. Per tale ragione, a partire dai dati progettuali disponibili, sono stati ipotizzati diversi scenari di gestione delle terre e rocce da scavo che prevedono, oltre ad un caso limite quale lo smaltimento in discarica, due scenari più virtuosi volti alla promozione dei principi promossi dalla cosiddetta "gerarchia dei rifiuti" e dai principi dell'economia circolare.

¹ https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics

3 Obiettivi e struttura della tesi

L'obiettivo del seguente elaborato di tesi è quello di utilizzare la metodologia LCA (*Life Cycle Assessment*), analisi del ciclo di vita, al fine di valutare gli impatti ambientali di diverse opzioni di trasporto e di valorizzazione/smaltimento di terre e rocce provenienti da operazioni di scavo. Il lavoro vuole fornire una base scientifica ed oggettiva, non solo a supporto di questo progetto, ma anche per futuri processi decisionali affini. La quantificazione degli impatti viene effettuata attraverso l'utilizzo del *software* SimaPro, all'interno del quale sono stati modellizzati i processi coinvolti a partire da quelli esistenti nel *database Ecoinvent*.

La seguente tesi è strutturata in cinque capitoli: introduzione, materiali e metodi, risultati, discussione e conclusioni.

Nel capitolo "*Introduzione*" è presentata la metodologia LCA soprattutto rispetto alla sua rilevanza come strumento in grado di fornire una stima quantitativa degli impatti ambientali anche in fase predittiva, e di poter supportare quindi, un processo decisionale, con applicazioni potenzialmente trasversali in diverse discipline. In questo primo capitolo viene descritto il quadro storico riguardante l'analisi LCA ed il concetto di sviluppo sostenibile dagli anni '60 fino ai nostri giorni. Inoltre, è presente un focus sull'inquadramento legislativo per quanto concerne il trattamento di terre e rocce da scavo che fornisce la cornice normativa all'interno della quale sono stati valutati gli scenari di gestione confrontati nello studio.

Nel capitolo "*Materiali e metodi*" è riportata la definizione e la struttura tipo di un'analisi LCA, con una spiegazione dettagliata delle quattro fasi da cui è costituita e i principali standard di riferimento: le UNI EN ISO 14040 e 14044. Vengono successivamente presentati gli strumenti utilizzati: il *software* SimaPro ed il *database* Ecoinvent.

Successivamente, viene presentata la descrizione del caso di studio in esame, il progetto di una galleria stradale, chiamata "*Variante alla Tremezzina*", ubicata in Lombardia e più precisamente sulla sponda occidentale del lago di Como. Il progetto è

stato sviluppato da Nexteco s.r.l., uno studio specializzato in ingegneria e management ambientale integrati che ha ospitato il tirocinio formativo. Oltre a una breve descrizione del progetto, vengono fornite informazioni quanto all'inquadramento geologico ed idrogeologico della zona, un riassunto delle indagini pregresse svolte nel sito e le volumetrie interessate. Di seguito, vengono riportate le modellizzazioni effettuate nel *software* SimaPro per le opzioni di valorizzazione dei materiali di scavo e le opzioni di trasporto riguardanti i quattro scenari esaminati.

Nel capitolo "*Risultati*" viene riportato l'esito dello studio LCA relativo a questo progetto. Sono dettagliate le prime tre fasi dell'analisi ed in particolare vengono riportati gli esiti relativi alle 18 categorie d'impatto considerate dal metodo *ReCiPe 2016 midpoint H*.

Nel capitolo "*Discussione*" è riportata l'interpretazione dei risultati ottenuti seguita poi dalle conclusioni complessive ottenute dallo studio.

4 Introduzione

Il Terzo Rapporto sull'economia circolare 2021 del Circular Economy Network (Circular Economy Network, 2021), oltre all'analisi aggiornata sullo stato dell'economia circolare in Italia, in comparazione con le altre principali economie europee, ovvero quella francese, spagnola, tedesca e polacca, approfondisce il ruolo dell'economia circolare nella transizione alla neutralità climatica e aggiorna l'analisi delle principali misure adottate in materia a livello nazionale ed europeo. La Commissione Europea, nel recente secondo Piano d'azione per l'economia circolare (UE Commission, 2022), sottolinea come con un modello lineare di economia, basato su un alto consumo di risorse ed energia, non sia possibile raggiungere la neutralità climatica. Per abbattere le emissioni di gas serra è necessario recuperare i divari di circolarità esistenti, relativi a:

- *riduzione dell'utilizzo delle risorse*, con la diminuzione della quantità di materiale usato nella realizzazione di un prodotto o nella fornitura di un servizio attraverso il design circolare, puntando su modelli di condivisione e sullo sviluppo della digitalizzazione (UE Commission, 2022);
- *allungamento dell'utilizzo delle risorse*, ottimizzandone l'uso e aumentando la vita del prodotto attraverso un design durevole, il ricorso a materiali e servizi che prolungano la vita dei beni, il riutilizzo, la riparazione e la rigenerazione (UE Commission, 2022);
- *utilizzo di materie prime rigenerate*, sostituendo i combustibili fossili e i materiali non rinnovabili con energie e materiali rinnovabili, mantenendo il capitale naturale e i servizi ecosistemici (UE Commission, 2022);
- *riutilizzo delle risorse*, con il riciclo dei rifiuti e il reimpiego delle materie prime seconde (UE Commission, 2022).

Nell'ambito del Green Deal, a livello europeo il nuovo Piano di azione per l'economia circolare e la nuova Strategia industriale vanno nella direzione di accelerare la transizione verso la circolarità (Circular Economy Network, 2021). Una recente

risoluzione del Parlamento europeo² sottolinea che la transizione a un'economia circolare è una delle condizioni necessarie per raggiungere entro il 2050 la neutralità climatica (Circular Economy Network, 2021). Anche per questa ragione, l'Europarlamento chiede alla Commissione di definire obiettivi vincolanti al 2030 di riduzione dell'uso di materie prime vergini e di incremento del contenuto di materiali riciclati nei prodotti. In Italia nel corso del 2020 sono entrati in vigore i decreti legislativi di recepimento delle direttive europee in materia di rifiuti ed economia circolare (la direttiva quadro sui rifiuti (2008/98/CE) e le direttive "speciali" in materia di rifiuti di imballaggio (1994/62/CE), discariche (1999/31/CE), rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche, cosiddetti RAEE (2012/19/UE), veicoli fuori uso (2000/53/CE) e rifiuti di pile e accumulatori (2006/66/CE))³ e la Legge di bilancio del 2020 ha previsto specifiche agevolazioni per gli investimenti delle imprese nell'ambito delle misure di Transizione 4.0. Per quanto riguarda l'anno 2021, i dati raccolti mostrano che le performance nazionali di circolarità nel settore della produzione si confermano migliori rispetto alle altre quattro principali economie europee (Circular Economy Network, 2021).

Dal confronto, emerge che il nostro Paese rappresenta la realtà con i consumi minori insieme alla Spagna. Nel 2018 i primi cinque paesi per consumo di energia coincidevano con le cinque economie più avanzate del continente. In particolare, l'Italia impiega circa 116.000 TEP (Tonnellate Equivalenti Petrolio) di energia all'anno, rimanendo costante rispetto all'anno precedente. In termini di quota di energia rinnovabile utilizzata rispetto al consumo totale di energia, l'Italia perde il suo primato scendendo al secondo posto, dietro alla Spagna, con il 18,2% di energia prodotta da fonti rinnovabili rispetto al consumo finale lordo (Circular Economy Network, 2021).

Per l'individuazione di obiettivi sufficientemente ambiziosi in materia di economia circolare sono necessari dati concreti ed analisi già esistenti che possano supportare scelte ponderate e consapevoli. A tale scopo, sono stati sviluppati numerosi approcci metodologici utilizzabili per la fase di individuazione e valutazione degli impatti, che

² Risoluzione del Parlamento europeo del 21 ottobre 2021 sulla conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici 2021 in programma a Glasgow, Regno Unito (COP26) (2021/2667(RSP)) (2022/C 184/09)

³ https://temi.camera.it/leg18/post/OCD15_14155/pubblicati-i-decreti-sull-economia-circolare.html

possono essere qualitativi o quantitativi e possono riferirsi a modelli di analisi e simulazione (Bresso et al., 1985).

Nel caso della valutazione comparativa di alternative progettuali e allo scopo di stimare l'impatto ambientale, tra i numerosi metodi e strumenti esistenti i più diffusi risultano essere: checklists, matrici, network, mappe sovrapposte e GIS, metodi quantitativi, ecc. Ma l'approccio migliore per la valutazione di progetti di carattere ambientale e territoriale risulta essere l'analisi multicriteriale (MCDA – *Multi-Criteria Decision Analysis*). L'MCDA consiste nell'identificazione di un certo numero di alternative di soluzione e di un insieme di criteri di valutazione di tipo diverso, che spesso non sono quantificabili con la stessa unità di misura, ma che questa metodologia è in grado di utilizzare in maniera integrata al fine di stabilire un ranking tra le alternative valutate secondo criteri di rilevanza di ciascun criterio che vengono chiariti in modo da essere trasparenti per i destinatari dei risultati dell'analisi. Questo meccanismo consente di rendere espliciti i vantaggi e gli svantaggi che ogni alternativa comporterebbe se realizzata (Bresso et al., 1985).

Tali analisi, oltre a fornire una base informativa utile, sono in grado di integrare anche valutazioni economiche e sociali che garantiscano scelte più robuste in ottica di sostenibilità potenzialmente applicabili in vari ambiti.

Verso la fine degli anni '60 era emersa la necessità di una valutazione che considerasse l'intero ciclo di vita delle filiere produttive con lo scopo di ottimizzare la gestione delle risorse energetiche e delle materie prime. Negli anni successivi il *Life Cycle Thinking* proseguì la sua evoluzione introducendo il bisogno di includere nuovi parametri quali le emissioni atmosferiche, le emissioni in acqua o i rifiuti solidi (Jensen et al., 1997).

Durante gli anni '90 l'interesse per l'LCA crebbe e nonostante venisse riconosciuta l'importanza di questa metodologia, molte erano le critiche rivolte sia alle modalità di svolgimento sia ai risultati ottenuti. Nel 1993 l'Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione (ISO) iniziò indagini e studi allo scopo di armonizzare tutti gli strumenti dell'LCA in modo da definire un modello unico e conferire maggior robustezza e integrità allo strumento (Fava et al., 2014).

L'LCA è un importante strumento perché permette la comparazione di prodotti e processi produttivi simili, permette di quantificare gli impatti o le criticità, e di mettere in evidenza, al contempo, i benefici ambientali; inoltre è la base per poter prendere delle decisioni ed effettuare delle valutazioni scientifiche.

La valutazione del ciclo di vita (*Life Cycle Assessment - LCA*) è stata ampiamente utilizzata per quantificare gli impatti ambientali associati alle infrastrutture idriche urbane, compresi gli impianti di trattamento delle acque reflue (WWTP - *Waste Water Treatment Plant*) (Corominas et al., 2020). Il principale cambiamento che riguarda questo settore è stato il passaggio da un paradigma di rimozione degli inquinanti a uno che include il recupero delle risorse (Guest et al., 2009) e il perseguimento di economie circolari, in questo contesto l'LCA può svolgere un importante ruolo strategico permettendo di stimare quantitativamente gli impatti sull'ambiente e di individuare alternative tecnologiche e progettuali più sostenibili (Corominas et al., 2020; (Lundie et al., 2004). Il chiarimento delle implicazioni ambientali delle modifiche degli WWTP tramite LCA può essere piuttosto complesso a causa del coinvolgimento di molteplici processi (trattamento biologico principale, separazioni solido-liquido, ecc.) che sono interdipendenti (ad es., l'effluente di un processo è spesso influente per il successivo), e tali interdipendenze influenzano il consumo di risorse (ad esempio, energia, prodotti chimici) in modo non lineare. Le sfide attuali riguardano la gestione di tali complessità nell'applicazione dell'LCA che potrà essere supportata dallo sviluppo di una serie di migliori pratiche specificamente adattate a questo campo di studio (Corominas et al., 2020).

Un altro esempio è rappresentato dal settore del *food & beverage*; il packaging gioca un ruolo fondamentale nella produzione di alimenti e bevande e nelle catene di approvvigionamento (Sazdovski et al., 2021). Sebbene negli ultimi anni si sia registrato un costante aumento del volume dei rifiuti riciclati e recuperati nell'Unione Europea (UE), il volume dei rifiuti di imballaggio generati per cittadino è effettivamente aumentato da 163,3 kg nel 2007 a 169,7 kg nel 2016 ⁴. Pertanto, il ruolo del comportamento del cittadino (Roca i Puigvert et al., 2020), della gestione dei rifiuti di imballaggio (Abejón et al., 2020) e gestione dei rifiuti alimentari (Hoehn et al., n.d.) è

⁴ Eurostat, 2019. Statistiche sui rifiuti di imballaggio. Eurostat

essenziale (Sazdovski et al., 2021). Nel tentativo di mitigare questi impatti, saranno sempre più necessari sforzi per ridurre gli effetti ambientali dannosi delle diete e della produzione alimentare, anche attraverso l'uso di metodologie come le valutazioni del ciclo di vita (LCA) per accertare gli impatti di diversi prodotti e materiali nella produzione alimentare e imballaggio (Batlle-Bayer et al., 2019).

È possibile sfruttare gli studi di *Life Cycle Assessment* anche in ambito edilizio; il settore delle costruzioni è il principale responsabile degli impatti ambientali prodotti sul pianeta, in ragione dell'elevato consumo di suolo, risorse naturali ed energia e l'elevato rilascio di emissioni in terra, aria e acqua (Dalla Valle et al., 2016). Esso rappresenta il settore industriale che influisce maggiormente sul carico esercitato sull'ambiente e, di conseguenza, le azioni intraprese in edilizia assumono una rilevanza significativa in una prospettiva di sostenibilità ambientale (Dalla Valle et al., 2016). Tuttavia è possibile osservare come, negli ultimi anni, l'introduzione di apparati normativi e di sistemi di certificazione, orientati a considerare le implicazioni ambientali delle scelte progettuali nell'intero ciclo di vita di un edificio, abbia posto anche nell'ambito della progettazione il problema di affrontare la questione dell'efficienza ambientale, facendo riferimento alla metodologia LCA (Dalla Valle et al., 2016). Il metodo LCA, tramite una valutazione integrale dei consumi e delle emissioni inquinanti derivanti, fornisce le informazioni ambientali di supporto alle scelte di progetto, sia per materiali e componenti edili che per soluzioni tecnico-costruttive ed impiantistiche (Dalla Valle et al., 2016).

Si ricorda poi il risanamento ambientale, ambito affine all'applicazione del presente studio e molto ricco di studi inerenti al tema dell'applicazione di criteri di sostenibilità e all'interno del quale l'LCA trova spazio soprattutto nell'ambito delle valutazioni di livello 3 (quantitative), come di seguito descritto. Per quanto riguarda l'esperienza italiana in questo contesto, nel 2012 è nato il SuRF Italy ovvero Sustainable Remediation Forum, e con esso il "*Libro Bianco*". L'obiettivo del documento è stato quello di enunciare i principi, l'ambito di applicazione e le principali linee di attività che connotano un approccio sostenibile al processo di bonifica in Italia (SuRF Italy, 2014).



Figura 1 - Logo SuRF Italy ⁵

In tale contesto si è definito anche come si declina il concetto di sviluppo sostenibile nell'ambito del risanamento ambientale: *“Operare in modo sostenibile significa creare valore per i portatori di interesse ed utilizzare le risorse in modo tale da non compromettere i fabbisogni delle generazioni future, rispettando le persone, l'ambiente e la società nel suo complesso”* (Chiesa, 2011).

Tale equilibrio tra costi e benefici nella ricerca della migliore soluzione tenendo in considerazione la dimensione ambientale, sociale ed economica, deve essere perseguito soddisfacendo i principi chiave sotto riportati:

Principio 1: Protezione della salute umana e dell'ambiente, nel presente e nello stato futuro, considerando la destinazione d'uso del sito (SuRF Italy, 2014).

Principio 2: Procedure di lavoro sicure. La bonifica di un sito deve garantire la sicurezza per i lavoratori e per le comunità locali, minimizzando gli impatti sull'ambiente (SuRF Italy, 2014).

Principio 3: Scelte coerenti, chiare e riproducibili, basate sull'evidenza (SuRF Italy, 2014).

Principio 4: Documentazione trasparente. Ogni aspetto sulla scelta della bonifica deve essere documentato in maniera chiara, al fine di permettere a tutte le parti interessate di capire i motivi alla base delle scelte adottate (SuRF Italy, 2014).

Principio 5: Coinvolgimento degli stakeholder. Tutti i soggetti coinvolti in senso lato nella progettazione e realizzazione di una bonifica devono essere coinvolti e il

⁵ SuRF Italy. Sostenibilità nelle Bonifiche in Italia. 28 (2014)

loro punti di vista devono essere eventualmente integrati nel processo decisionale (SuRF Italy, 2014).

La valutazione della sostenibilità degli interventi di bonifica è un processo complesso in quanto la sostenibilità non è un concetto misurabile in maniera semplice ed è valutabile solo a partire da un processo soggettivo e temporaneo (ISO, 2017) che richiede un appropriato coinvolgimento degli attori in gioco, i quali vanno incoraggiati a contribuire con la loro prospettiva per fare un bilancio di impatti e benefici potenziali e facilitare così un loro accordo (ISO, 2017). La valutazione della sostenibilità di un processo/progetto/intervento è una procedura generalmente comparativa, in cui le diverse opzioni vengono valutate attraverso criteri simili, al fine di definire quale sia quella che risponde in maniera più confacente agli obiettivi prefissati. Il risultato, quindi, non è quello di formulare, per ciascuna alternativa di bonifica, un valore assoluto di sostenibilità valido per la comparazione con altri progetti sviluppati in contesti diversi, ma di fornire una misura comparativa valida all'interno del contesto in cui è stata analizzata. Il processo metodologico per il calcolo della sostenibilità prevede diversi livelli di approfondimento che rispecchino il grado di complessità del progetto di riqualificazione del sito, in modo che la complessità della valutazione sia proporzionale alla scala del progetto o al problema al quale si sta rispondendo. I tre livelli di valutazione sono: qualitativo, semi-quantitativo e quantitativo come rappresentato in Figura 2.

	Tipo di Analisi	Approcci disponibili
Livello 1 Qualitativo	Qualitativa basata sugli elementi di sostenibilità più significativi	BMPs (Gestione delle buone pratiche), Checklists, Linee guida, Regole empiriche, Matrici, Valutazioni
Livello 2 Semi quantitativo	Semiquantitativa focalizzata a pochi, fondamentali dati sitespecifici	Fogli di calcolo, Punteggi e pesi, Proiezioni di rischio, Calcolo esposizioni, emissioni, Analisi costi/benefici semplice o di dettaglio,
Livello 3 Quantitativo	Quantitativa, sitespecifica con analisi di pratiche, processi, tecnologie	Analisi ciclo di vita, Valutazione ai confini, Analisi energetica, Ritorno sociale degli investimenti, Calcolo del beneficio netto, Analisi multicriterio

Figura 2 - Livelli analisi indicatori di sostenibilità nelle bonifiche ⁶

⁶ SuRF Italy. Sostenibilità nelle Bonifiche in Italia. 28 (2014)

Il primo livello di analisi è di tipo qualitativo; si può avvalere di indicatori non numerici e si basa su categorie molto semplici ad esempio migliore, uguale o peggiore. Il secondo livello rappresenta una valutazione semi-quantitativa; in questo caso vengono associati ai dati qualitativi dei semplici dati quantitativi derivati da fogli di calcolo. Il terzo livello di analisi è il più quantitativo e si basa su procedure LCA (SuRF Italy, 2014).

A partire dalla breve e non esaustiva disamina svolta in merito all'applicazione della metodologia LCA in vari contesti, è possibile affermare come risulti sempre più auspicabile riuscire ad integrare considerazioni di carattere ambientale in ogni processo decisionale, nei più diversi ambiti (Baldo, 2005).

In questo lavoro di tesi la metodologia LCA verrà applicata ai CDW ovvero Construction and Demolition Waste, ossia quella categoria di rifiuti che contribuisce per un terzo al totale dei rifiuti generati in Europa e che è costituita da una varietà di materiali (e.g. cemento, mattoni, legno, vetro, metalli e plastica) e include tutto ciò che deriva dalle attività di costruzione e demolizione di edifici e infrastrutture e dalla manutenzione delle reti viarie. Nel 2020, i rifiuti totali generati nell'UE da tutte le attività economiche e le famiglie ammontavano a $2,1 \cdot 10^{12}$ kg (2151 milioni di tonnellate) o $4,810^3$ kg pro capite. Le quote relative alla produzione totale di rifiuti nel 2020 delle diverse attività economiche e delle famiglie è presentata in Figura 3 (Eurostat, 2021). Nell'UE, l'edilizia ha contribuito per il 37,1% al totale ed è stata seguita dall'estrazione mineraria (23,4%), dall'industria manifatturiera (10,9%), servizi idrici e rifiuti (10,7%) e famiglie (9,5%); il restante 8,4 % è costituito da rifiuti generati da altre attività economiche, principalmente servizi (4,5%) ed energia (2,3%) (Eurostat, 2021).

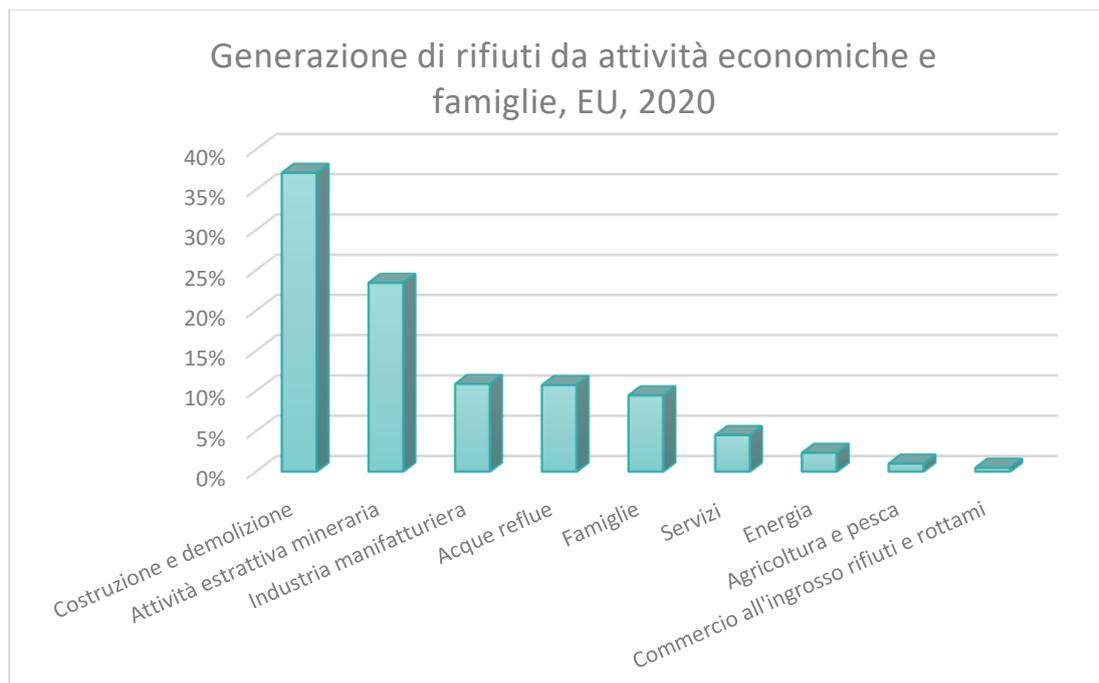


Figura 3 - Generazione di rifiuti da attività economiche e famiglie, EU, 2020⁷

I CDW rappresentano una classe eterogenea di materiali, tra i quali si individuano calcestruzzo, mattoni, tegole, miscele bituminose, gesso, legno, vetro, metalli, plastica, solventi, amianto e terra. La frazione di inerti non pericolosi è la più abbondante e, proprio da questa classe, dopo appropriati processi di valorizzazione, è possibile recuperare prodotti secondari che possono venire utilizzati nella costruzione di abitazioni o strade, in sostituzione o in combinazione con risorse minerarie naturali (Borghi et al., 2017).

In Figura 4 è illustrato lo sviluppo del trattamento dei rifiuti nell'UE, riguardo le due principali categorie di processamento ovvero recupero e smaltimento, nel periodo 2004-2020. La quantità di rifiuti recuperati, ovvero riciclati, utilizzati per il riempimento (l'utilizzo di rifiuti nelle aree scavate a fini di bonifica o messa in sicurezza dei pendii o per scopi ingegneristici in ambito paesaggistico) o inceneriti con recupero energetico è cresciuta del 40,3 % da 870 milioni di tonnellate nel 2004 a 1221 milioni di tonnellate nel 2020; di conseguenza, la quota di tale recupero sul trattamento totale dei rifiuti è aumentata dal 45,9 % nel 2004 al 60,2 % nel 2020. La quantità di rifiuti oggetto di

⁷ Eurostat 2022, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics

smaltimento è diminuita da 1027 milioni di tonnellate nel 2004 a 808 milioni di tonnellate nel 2020, una diminuzione del 21,3%. La quota di smaltimento nel trattamento totale dei rifiuti è diminuita dal 54,1 % nel 2004 al 39,8 % nel 2020.

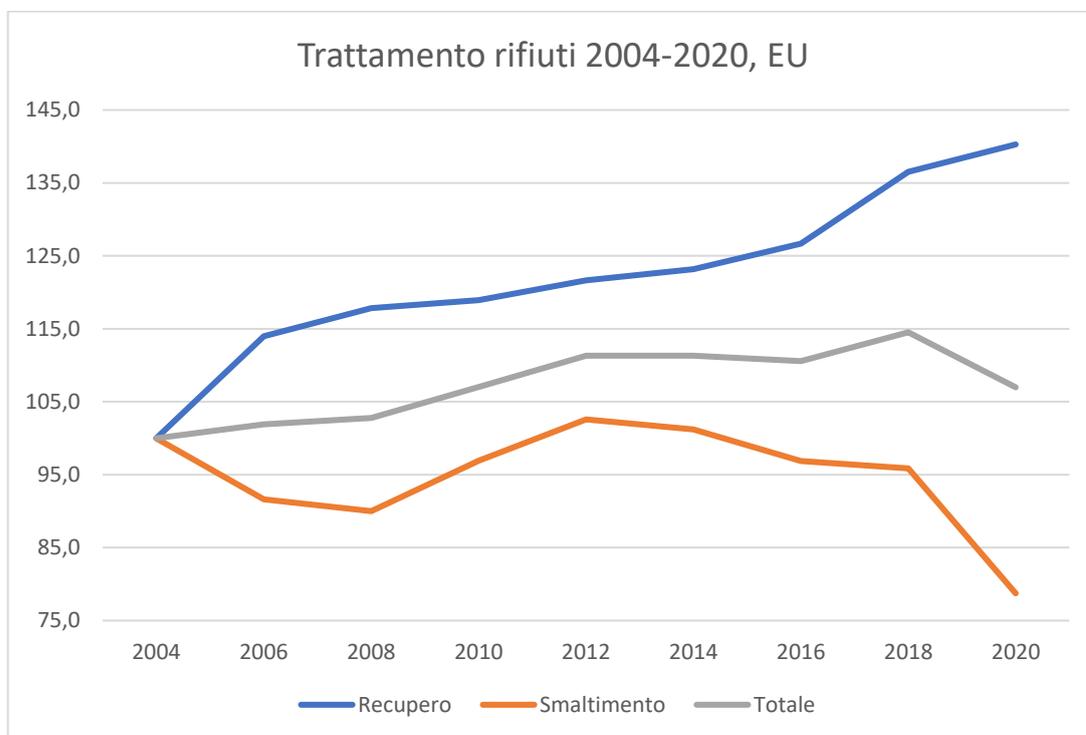


Figura 4 - Trattamento rifiuti, EU, 2004-2020 ⁸

Come affermato in precedenza, nell'UE nel 2020 più della metà (60,2%) dei rifiuti è stata trattata in operazioni di recupero: riciclaggio (39,2% del totale dei rifiuti trattati), riempimento (14,6%) o recupero di energia (6,4%) (Eurostat, 2021). Il restante 39,8 % è stato conferito in discarica (31,3 %), incenerito senza recupero di energia (0,5 %) o smaltito in altro modo (8,1 %) (Eurostat, 2021). È interessante osservare le differenze tra gli Stati membri dell'UE per quanto riguarda l'uso che hanno fatto di questi vari metodi di gestione, come rappresentato in Figura 5. Ad esempio, alcuni Stati membri avevano tassi di riciclaggio molto elevati (Italia, Belgio, Slovacchia e Lettonia), in altri la discarica è la categoria di trattamento prevalente (Romania, Bulgaria, Finlandia, Svezia e Grecia) (Eurostat, 2021).

⁸ Eurostat 2022, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics

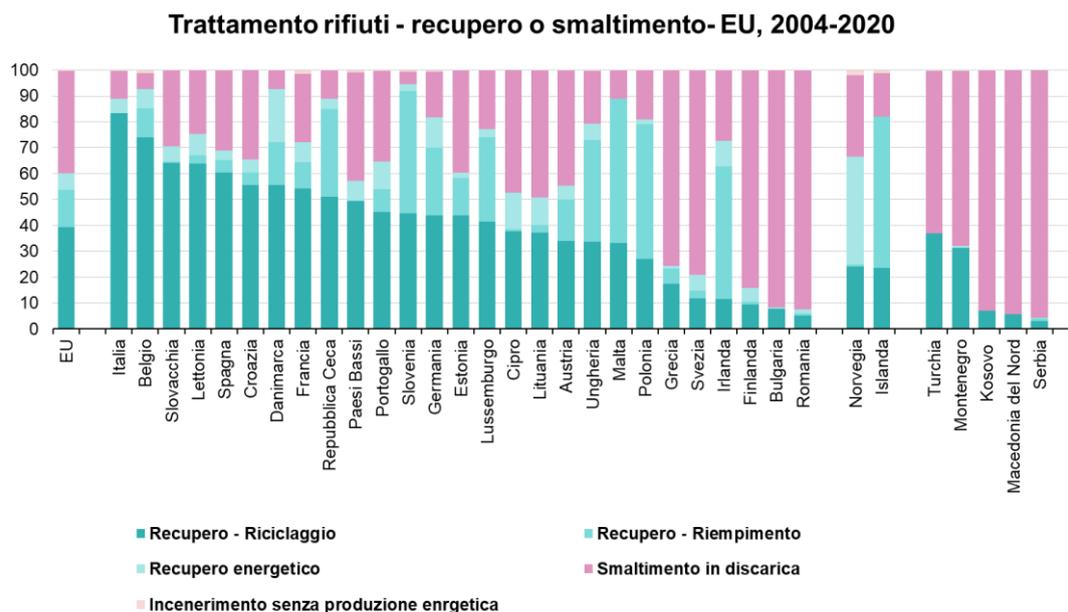


Figura 5 - Trattamento rifiuti - recupero o smaltimento - EU, 2004-2020⁹

In questa prospettiva, la Direttiva Quadro Rifiuti (2008/98/EC) prevede una vera e propria “gerarchia dei rifiuti” che si traduce in un ordine di priorità nella legislazione e nella politica di prevenzione e gestione dei rifiuti. È la pietra angolare delle politiche e della legislazione sui rifiuti dell’Unione Europea (Unione) ed il suo obiettivo è duplice:

- ridurre al minimo gli impatti negativi della produzione e della gestione dei rifiuti;
- migliorare l’efficienza delle risorse.

La gerarchia è generalmente rappresentata sotto forma di una piramide rovesciata con le opzioni (di seguito descritte) preferite all’estremità superiore e, alla base, lo smaltimento come soluzione di ultima istanza per gestire i rifiuti.

Prevenzione: misure che, prese prima che una sostanza, un materiale o un prodotto siano diventati rifiuti, riducono

- la quantità di rifiuti, anche attraverso il riutilizzo dei prodotti o l’estensione della durata di vita dei prodotti;
- gli impatti negativi dei rifiuti generati sull’ambiente e sulla salute umana; o

⁹ Eurostat 2022, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics

- il contenuto di sostanze nocive nei materiali e nei prodotti.

Preparazione per il riutilizzo: operazioni di recupero volte a controllo, pulizia o riparazione, con le quali prodotti o componenti di prodotti che sono diventati rifiuti vengono preparati in modo da poter essere riutilizzati senza altri trattamenti preparatori.

Riciclaggio: qualsiasi operazione di recupero attraverso la quale i materiali di scarto vengono ritrattati per ottenere prodotti, materiali o sostanze, sia per gli usi originali che per altri usi. Include il ritrattamento di materiale organico (ad esempio il compostaggio), ma non include il recupero di energia e il ritrattamento per ottenere materiali da usare come combustibili o per operazioni di riempimento.

Altro recupero (per esempio recupero di energia): qualsiasi altra operazione il cui risultato principale è un rifiuto che serve a uno scopo utile sostituendo altri materiali che sarebbero stati altrimenti utilizzati per assolvere una funzione particolare, o un rifiuto preparato per assolvere tale funzione, in un impianto o nell'economia in generale.

Smaltimento: qualsiasi operazione che non sia di recupero, anche se l'operazione ha come conseguenza secondaria il recupero di sostanze o di energia (per esempio, discarica, incenerimento).

In forza di tale normativa, la UE ha richiesto agli stati membri che *“entro il 2020 la preparazione per il riutilizzo, il riciclaggio e altri tipi di recupero di materiale, incluse operazioni di colmatazione che utilizzano i rifiuti in sostituzione di altri materiali, di rifiuti da costruzione e demolizione non pericolosi, escluso il materiale allo stato naturale definito alla voce 17 05 04 dell'elenco dei rifiuti, deve essere aumentata almeno al 70% in termini di peso”*¹⁰ questo perché, attraverso opportuni processi di trattamento si possono produrre materie prime seconde utilizzabili in edilizia re-inserendoli nel mercato. Per questo motivo si può osservare un interesse costante e crescente da parte delle pubbliche autorità per assicurare una gestione sostenibile di CDW su scala locale e regionale, non solo per ridurre i carichi ambientali associati alla generazione di rifiuti,

¹⁰ Art. 181 D. Lgs. 152/06

ma anche per mitigare l'esaurimento di risorse minerarie indotto dalle attività di costruzione (Borghi et al., 2017).

4.1 Cenni sull'attualità del principio di sviluppo sostenibile

La prima definizione di sviluppo sostenibile proviene dal report *Our Common Future*, pubblicato nel 1987 a seguito della formazione della Brundtland Commission. In esso si riporta che lo sviluppo sostenibile è lo sviluppo che incontra i bisogni del presente senza compromettere l'abilità delle future generazioni di sopperire alle loro necessità (Brundtland, 1987)¹¹. Il report fu poi trasformato in un piano d'azione globale nel 1992 all'*Earth Summit* tenutosi a Rio de Janeiro. Il piano d'azione fu rinominato "*Agenda 21*" e fu stilata una lista di 27 principi definita "*Dichiarazione di Rio*". Assieme ad *Agenda 21* e alla *Dichiarazione di Rio*, prese corpo un concetto fondamentale definito *Triple Bottom Line*, che spostò l'attenzione su tre sfere d'interesse: *People, Profit, Planet* (modello delle 3P); quindi sviluppo a livello umano, economico ed ambientale.

Passando attraverso la stesura del protocollo di Kyoto del 1997 e del *GHG Protocol* si arriva agli anni 2000, momento in cui vengono definiti i *millennium development goals*, obiettivi comuni che riguardano i 193 stati membri dell'ONU su diverse tematiche di interesse comune. Nel 2012 vengono valutati i progressi relativi agli obiettivi individuati in *Agenda 21*, che si dimostrano essere piuttosto limitati. La probabile causa del fallimento viene imputata alla mancanza di linee guida precise per il conseguimento di tali scopi e per sopperire a questa mancanza, nel 2015, viene sottoscritta, dai governi dei 193 paesi, l'*Agenda 2030*. Essa contiene i 17 SDG (illustrati in Figura 6), ovvero *Sustainable Development Goals* da raggiungere entro il 2030, che vanno a sostituire i *millennium development goals*.¹²

¹¹ "Development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs"

¹² <https://sdgs.un.org/goals>



Figura 6 - Sustainable Development Goals ¹³

Per tradurre concretamente i desideri nell’ambito della programmazione economica, sociale ed ambientale, l’Italia deve declinare i principi dell’Agenda 2030¹⁴. A questo scopo nasce la Strategia Nazionale di Sviluppo Sostenibile che aggiorna la precedente “Strategia d’azione ambientale per lo sviluppo sostenibile in Italia 2002-2010” e ne amplia il raggio d’azione. Essa è strutturata in cinque aree di intervento, corrispondenti alle “5P” dello sviluppo sostenibile proposte dall’Agenda 2030, ciascuna delle quali contiene Scelte Strategiche e Obiettivi Strategici per l’Italia, correlati agli obiettivi per lo sviluppo sostenibile dell’Agenda 2030 e richiama alla profonda interrelazione tra dinamiche economiche, crescita sociale e qualità ambientale, aspetti conosciuti anche come i tre pilastri dello sviluppo sostenibile ¹⁵.

Le cinque P corrispondono a vari ambiti di azione per i quali sono previsti specifici obiettivi come di seguito elencato:

- **Persone:** contrastare povertà ed esclusione sociale e promuovere salute e benessere per garantire le condizioni per lo sviluppo del capitale umano;
- **Pianeta:** garantire una gestione sostenibile delle risorse naturali, contrastando la perdita di biodiversità e tutelando i beni ambientali e culturali;

¹³ <https://sdgs.un.org/goals>

¹⁴ <https://www.regione.piemonte.it/web/temi/strategia-sviluppo-sostenibile/strategia-nazionale-per-sviluppo-sostenibile-0>

¹⁵ <https://www.agenziacoesione.gov.it/comunicazione/agenda-2030-per-lo-sviluppo-sostenibile/>

- **Prosperità:** affermare modelli sostenibili di produzione e consumo, garantendo occupazione e formazione di qualità;
- **Pace:** promuovere una società non violenta ed inclusiva, senza forme di discriminazione. Contrastare l'illegalità;
- **Partnership:** intervenire nelle varie aree in maniera integrata ¹⁶.

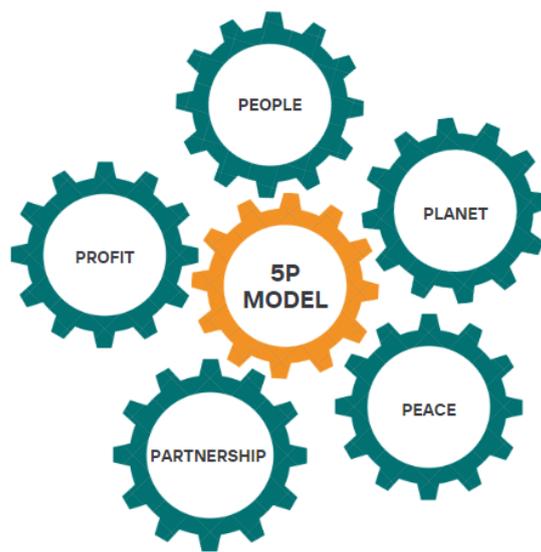


Figura 7 - Modello delle 5P ¹⁷

L'attuazione degli obiettivi stabiliti dall'Agenda 2030 viene monitorata annualmente dall'High Level Political Forum, un forum politico comprendente ministri dei paesi delle Nazioni Unite. Ogni quattro anni invece, la riunione si tiene a livello dei capi di stato e di Governo.

Nonostante le diverse definizioni e le molteplici sfaccettature del concetto di sviluppo sostenibile, è possibile identificare cinque elementi, principi chiave, che caratterizzano e accomunano le diverse versioni.

Il primo è rappresentato dall'equità: come sottolineato dal Rapporto Brundtland, lo sviluppo sostenibile è impossibile se povertà e ingiustizie sociali permangono (Cassin and Foscari, 2006).

¹⁶ <https://www.agenziacoesione.gov.it/comunicazione/agenda-2030-per-lo-sviluppo-sostenibile/>

¹⁷ Produzione personale

Il secondo aspetto caratteristico è costituito da democrazia e partecipazione che svolgono un ruolo importante sia nei paesi in via di sviluppo che in quelli più ricchi, quando è necessario ottenere il supporto pubblico per l'attuazione di iniziative a carattere ambientale (Cassin and Foscarì, 2006).

Lo sviluppo sostenibile deve fare i conti con la complessità e l'incertezza che spesso circondano questioni di carattere ambientale. Tenuto conto di ciò, come ribadito da Agenda 21, occorre seguire il "*principio di precauzione*" e, quindi, la mancanza di certezze scientifiche non può e non deve tradursi in una posposizione di misure per la protezione dell'ambiente (Cassin and Foscarì, 2006).

Quarto elemento distintivo è l'integrazione nelle diverse politiche delle considerazioni di carattere ambientale. La frammentazione delle responsabilità, infatti, rappresenta uno dei principali ostacoli allo sviluppo sostenibile che, invece, richiede l'integrazione degli aspetti ambientali nella formulazione e nell'implementazione delle politiche settoriali (Cassin and Foscarì, 2006).

Infine, lo sviluppo sostenibile deve essere pianificato, come ribadito da Agenda 21; la pianificazione, infatti, rappresenta il quinto e ultimo principio chiave dello sviluppo sostenibile.

Per perseguire tutti gli obiettivi concernenti lo sviluppo sostenibile e definiti dalla UE sono necessari diversi strumenti per intervenire su politiche, piani e programmi, sui prodotti, sui costi ambientali e finanziariamente. Lo studio LCA risulta particolarmente indicato tra i metodi d'intervento per i prodotti ed in particolare nella "*Politica integrata dei prodotti*". Esso, infatti, si svolge nel rispetto di uno standard ISO e fornisce dati di impatto oggettivi che possono fornire informazioni utili a rafforzare e a riorientare le politiche ambientali concernenti i prodotti, per promuovere lo sviluppo di quelli più ecologici.

Il richiamo continuo al concetto di sviluppo sostenibile fa da sfondo alle politiche che vengono periodicamente adottate, ma per essere realmente perseguito ha la necessità di avvalersi di strumenti che siano in grado di stimare gli impatti e di fornire una base informativa indispensabile per orientare le scelte soprattutto in ambito di pianificazione e in via predittiva.

4.2 Scenari di gestione dei materiali da scavo e quadro normativo di riferimento

Relativamente alla gestione delle terre e rocce da scavo, l'ipotesi di scenari di gestione alternativi è stata preceduta da un'analisi della normativa di settore utile a definire scenari coerenti con le normative di riferimento, ossia il Regolamento contenuto nel D.M. 161 del 10/08/2012 e il D.P.R. del 13 giugno 2017, n. 120 e il d.lgs. 152/06 e ss.mm.ii.

Gli scenari di gestione scelti per il confronto sono:

- lo smaltimento in discarica per inerti (disciplinato dalla parte IV del d.lgs. 152/06);
- la preparazione per il riutilizzo (presso impianti autorizzati per la produzione di materiali *End of Waste*);
- il recupero tal quale come sottoprodotto, nel rispetto del DPR 120/2017.

4.2.1 Smaltimento in discarica

Nel caso dello scenario di gestione relativo ad impianti di discarica, il materiale viene inteso come rifiuto secondo la definizione di cui all'art. 183 comma 1 lettera a) del d.lgs. 152/06 e smaltito con codice CER 170504. La necessità di gestione di questi materiali come rifiuti può verificarsi in seguito a difficoltà di allocazione in impianti di preparazione per il riutilizzo e non è necessariamente legata a problematiche inerenti a caratteristiche di contaminazione dei materiali. Anche la non conformità delle tempistiche di deposito nel sito di origine (che possono estendersi per mancanza di disponibilità nei siti di destino o per altre difficoltà legate ai trasporti) possono imporre al produttore di dover gestire i materiali come rifiuti per accelerarne la fuoriuscita dal cantiere.

4.2.2 Preparazione per il riutilizzo (EoW)

Lo scenario preso in considerazione riguarda la possibilità per i materiali oggetto di indagine di essere conferiti come rifiuti in impianti autorizzati alla preparazione per il riutilizzo che siano in possesso di autorizzazione (ordinaria ex art 208 d.lgs. 152/06 o semplificata ex D.M. 5/2/98). Gli impianti autorizzati sono deputati al trattamento dei rifiuti (pericolosi, non pericolosi o entrambe le categorie a seconda dell'autorizzazione specifica) ai fini di recupero. I rifiuti in ingresso possono cioè, previo trattamento, non sottostare più alla qualifica di "rifiuto" per essere considerati a tutti gli effetti materiali riutilizzabili che possono essere scambiati sul mercato. Nel caso di specie, i trattamenti che i materiali possono subire possono corrispondere a operazioni unitarie di vagliatura, triturazione, lavaggio, separazione gravimetrica e granulometrica che li rendano pronti al riuso.

Sebbene gli inerti abbiano origine differente, la loro lavorazione avviene sempre all'interno di impianti specifici che possono avere varie dimensioni e diverse capacità. Gli aggregati che derivano dal riciclaggio dei CDW (Construction and Demolition Waste), a prescindere dagli impianti utilizzati (che possono essere mobili o fissi), i quali si differenziano anche in funzione delle innovazioni tecnologiche prodotte dalle varie aziende, attraversano una serie di fasi produttive:

- alimentazione, che può avvenire tramite alimentatori o sistemi di tramogge molto resistenti in grado di sopperire a carichi ingenti;
- frantumazione, la fase più importante dell'intero processo. Essa può avvenire per impatto delle macerie scagliate contro una parete resistente, per compressione del materiale fra due ganasce o per triturazione provocata da elementi resistenti messi in moto insieme al materiale da frantumare. A seconda delle dimensioni finali richieste possono essere presenti più step di frantumazione, pertanto, ciò che esce dal primo frantoio viene mandato al secondo per diminuirne la pezzatura. È possibile avere anche una terza frantumazione per raggiungere dimensioni finissime;

- abbattimento delle polveri, che si rende necessario dal momento che gli inerti frantumati ne generano in grandi quantità. I sistemi possono essere di due tipologie ovvero attraverso l'utilizzo di acqua nebulizzata spruzzata tramite ugelli oppure aspirazione tramite flussi d'aria;
- deferrizzazione, che avviene tramite calamite. Lo scopo è andare ad eliminare i residui ferrosi dai prodotti ottenuti;
- vagliatura, che governa la pezzatura del materiale in uscita. Rappresenta lo stadio di selezione finale in seguito ai vari step di frantumazione. Anche in questo caso si possono avere diverse tipologie di vagli come i vagli a piani, i vagli rotativi o i vibrovagli;
- lavaggio, per eliminare dagli inerti impurità come humus, argilla, polveri ecc. Si ricorre principalmente a tre tipologie diverse di macchine: lavatrici a spruzzo; lavatrici cilindriche e lavatrici a coclea (Laurenti and Bonoli, 2008).

Sono presenti sia impianti fissi che impianti mobili; gli impianti fissi sono quegli impianti dotati di fondazioni, e per via di esse non possono essere spostati facilmente. Viceversa, gli impianti mobili non hanno fondazioni e possono essere spostati nelle diverse locazioni, tipicamente nei cantieri di demolizione; gli impianti mobili sono pure muniti di ruote o cingoli per spostarsi più agevolmente dal rimorchio che li trasporta al luogo dove viene realizzata la demolizione. Generalmente gli impianti fissi hanno più spazio a loro disposizione, quindi, vengono progettati per essere più complessi e adatti ad ottenere un prodotto di migliore qualità. Viceversa, gli impianti mobili sono progettati per essere facilmente spostati da un luogo di demolizione al successivo, quindi sono in genere di dimensioni tali da non superare i limiti di sagoma concessi ai veicoli da autotrasporto. Gli impianti mobili eseguono il trattamento, sempre, dove ha luogo la demolizione, e restituiscono materiale utilizzabile poi come riciclato. Gli impianti fissi lo eseguono invece sempre nello stesso luogo, tipicamente in cava, e producono un materiale di migliore qualità (Laurenti and Bonoli, 2008).

4.2.3 Riutilizzo come sottoprodotto

Per quanto riguarda il DPR 120/2017, esso definisce le procedure per la corretta gestione ed il riutilizzo dei materiali da scavo in qualità di sottoprodotto ai sensi dell'art. 184-bis del D.Lgs. 152/06 e ss.mm.ii. Il decreto disciplina i criteri secondo i quali i materiali di scavo sono considerati rispondenti ai criteri di sottoprodotto, nonché descrive i riutilizzi di materiale all'interno del cantiere¹⁸. Il materiale non rispondente ai criteri di definizione di sottoprodotto deve essere gestito come rifiuto ai sensi della Parte IV del D.Lgs. 152/06 e s.m.i. presso impianti autorizzati.

Con sottoprodotto si indica *“una sostanza o un oggetto derivante da un processo di produzione il cui scopo primario non è la produzione di tale sostanza od oggetto”*; esso non viene considerato rifiuto, bensì sottoprodotto se sono soddisfatte le seguenti condizioni:

1. è certo che la sostanza o l'oggetto sarà ulteriormente utilizzata/o;
2. la sostanza o l'oggetto può essere utilizzata/o direttamente senza alcun ulteriore trattamento diverso dalla normale pratica industriale;
3. la sostanza o l'oggetto è prodotta/o come parte integrante di un processo di produzione;
4. l'ulteriore utilizzo è legale, ossia la sostanza o l'oggetto soddisfa, per l'utilizzo specifico, tutti i requisiti riguardanti i prodotti e la protezione della salute e dell'ambiente e non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o la salute umana”.¹⁹

Nel caso di terre e rocce da scavo costituiscono un trattamento di normale pratica industriale quelle operazioni, anche condotte non singolarmente, alle quali può essere sottoposto il materiale, finalizzate al miglioramento delle sue caratteristiche merceologiche per renderne l'utilizzo maggiormente produttivo e tecnicamente efficace; rientrano tra le operazioni di normale pratica industriale: la selezione granulometrica del materiale da scavo, la riduzione volumetrica mediante macinazione,

¹⁸ Articolo 5, Direttiva 2008/98/CE

¹⁹ Articolo 5, Direttiva 2008/98/CE

la stabilizzazione a calce e la stesa al suolo per consentire l'asciugatura e la maturazione del materiale da scavo al fine di conferire allo stesso migliori caratteristiche di movimentazione come riportato nel D.P.R. 120/2017, Titolo I, Articolo 2, comma 1, lettera o, all. 3²⁰.

All'interno del DPR 120/2017 sono presenti disposizioni di riordino e di semplificazione della disciplina inerente alla gestione delle terre e rocce da scavo, con particolare riferimento (DPR 120, 2017):

- a) alla gestione delle terre e rocce da scavo qualificate come sottoprodotti, ai sensi dell'articolo 184-bis, del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, provenienti da cantieri di piccole dimensioni, di grandi dimensioni e di grandi dimensioni non assoggettati a VIA (Valutazione di Impatto Ambientale) o ad AIA (Autorizzazione Integrata Ambientale), compresi quelli finalizzati alla costruzione o alla manutenzione di reti e infrastrutture;
- b) alla disciplina del deposito temporaneo delle terre e rocce da scavo qualificate come rifiuti;
- c) all'utilizzo nel sito di produzione delle terre e rocce da scavo escluse dalla disciplina dei rifiuti;
- d) alla gestione delle terre e rocce da scavo nei siti oggetto di bonifica.(DPR 120, 2017)

In particolare, gli articoli 8, 9, 10 e 11 si riferiscono a terre e rocce da scavo prodotte in cantieri di grandi dimensioni, focalizzandosi sul tema della redazione del Piano di Utilizzo Terre e Rocce da scavo (PUT), sulle caratteristiche chimiche dei materiali trattati e sulle concentrazioni soglia di contaminazione di cui alle colonne A e B, Tabella 1, Allegato 5, al Titolo V, della Parte IV, del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152.

²⁰ D.P.R. 120/2017, all. 3

5 Materiali e metodi

5.1 Metodologia Life Cycle Assessment (LCA)

5.1.1 Definizione dell'LCA

La *Life Cycle Assessment* - LCA (Analisi del Ciclo di Vita) è uno strumento per valutare gli impatti ambientali di un prodotto, di un processo o di un servizio lungo tutte le fasi del ciclo di vita ovvero "dalla culla alla tomba" (*from cradle to grave*). Tale valutazione viene effettuata attraverso la quantificazione di tutti gli input (risorse come acqua, energia e materie prime) e output (emissioni nell'ambiente esempio in aria, acqua e nel suolo) che caratterizzano il sistema in analisi (Jiménez-González et al., 2000).

Una prima definizione è stata fornita dalla SETAC, *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*, che definisce la metodologia LCA come "un procedimento obiettivo di valutazione dei carichi energetici e ambientali relativi ad un processo o un'attività effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale (Baldo, 2005)".

In particolare, tale analisi si pone l'obiettivo di identificare gli impatti ambientali diretti ed indiretti derivati dal sistema oggetto di studio attraverso la quantificazione degli input e output in termini di materia ed energia. Con il termine *impatto ambientale* si intende "l'alterazione qualitativa e/o quantitativa dell'ambiente (inteso come sistema di relazioni fra i fattori antropici, fisici, chimici, naturalistici, climatici, paesaggistici, architettonici, culturali ed economici) in conseguenza dell'attuazione sul territorio di piani o programmi o della realizzazione di progetti relativi a particolari impianti, opere o interventi pubblici o privati, nonché della messa in esercizio delle relative attività" come riportato nel Decreto Legislativo 152/2006 che all'art. 5, punto 1, comma c.

Attualmente l'LCA è definita due standard internazionali:

- *UNI EN ISO 14040 (2021): “Gestione ambientale”, “Valutazione del ciclo di vita”, “Principi e quadro di riferimento”*. La norma descrive i principi ed il quadro di riferimento per la valutazione del ciclo di vita (LCA)²¹.
- *UNI EN ISO 14044 (2021): “Gestione ambientale”, “Valutazione del ciclo di vita”, “Requisiti e linee guida”*. La norma specifica i requisiti e fornisce linee guida per la valutazione del ciclo di vita (LCA)²².

È quindi uno strumento che permette di perseguire iniziative di sviluppo sostenibile attraverso la valutazione dei potenziali impatti ambientali in un’ottica di bilancio complessivo del processo. L’LCA è infatti considerato uno strumento efficace per l’ottimizzazione e il miglioramento di prodotti e processi (Huybrechts et al., 1996).

I principi generali indicati nella norma che vengono utilizzati come guida per la pianificazione e la conduzione dell’LCA, sono:

- *Prospettiva del ciclo di vita*: si suggerisce di effettuare un’analisi completa che consideri l’intero ciclo di vita di un prodotto o un sistema. In tal modo risulta più facile individuare le implicazioni ambientali ed evitare potenziali errori o omissioni (“UNI EN ISO 14040,” 2006);
- *Attenzione focalizzata all’ambiente*: l’analisi LCA considera gli aspetti ambientali di un sistema. Nel caso in cui si desiderino effettuare valutazioni più estese contenenti anche gli aspetti sociali ed economici è necessario integrare lo studio LCA con altri strumenti (“UNI EN ISO 14040,” 2006);
- *Approccio relativo e unità funzionale*: tutto lo studio è strutturato sull’unità funzionale scelta (“UNI EN ISO 14040,” 2006);
- *Approccio iterativo*: l’LCA è una tecnica iterativa dove ogni singola elaborazione fa riferimento agli esiti delle altre fasi, il che permette di ottenere risultati più completi e coerenti (“UNI EN ISO 14040,” 2006);
- *Trasparenza*: essendo l’LCA una procedura molto complessa, la trasparenza dell’analisi è un elemento necessario per garantire un’interpretazione corretta dei risultati (“UNI EN ISO 14040,” 2006);

²¹ <https://store.uni.com/uni-en-iso-14040-2021>

²² <https://store.uni.com/uni-en-iso-14044-2021>

- *Completezza*: data dal fatto che tale analisi considera tutti gli aspetti relativi all'ambiente naturale, alla salute umana e alle risorse ("UNI EN ISO 14040," 2006);
- *Priorità dell'approccio scientifico*: le decisioni si basano preferibilmente su conoscenze scientifiche: sulle scienze naturali, su convenzioni internazionali o su altri approcci scientifici definiti. ("UNI EN ISO 14040," 2006).

L'LCA è un importante strumento perché permette la comparazione di prodotti e processi produttivi simili, permette di identificare le criticità del sistema analizzato, e al contempo evidenzia eventuali benefici ambientali; inoltre, si pone come importante strumento decisionale in fase progettuale.

5.1.2 Struttura

Inizialmente la struttura dell'LCA, definita durante una conferenza SETAC, prevedeva solamente tre fasi. Infatti, quella che oggi viene considerata la prima fase, ovvero la "definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione", venne inserita solo in un secondo momento (Fava et al., 2014).

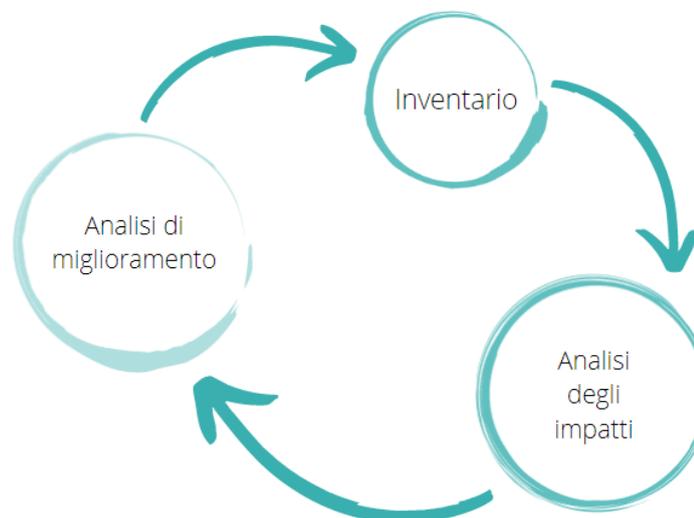


Figura 8 - Primo framework LCA ²³

²³ Produzione personale

SETAC rappresenta il primo organismo che si è interessato agli studi LCA, seguito poi da ISO (*International Standards Organization*), UNEP (*United Nations Environment Programme*) e dalla Commissione Europea.

Nel 1993 durante il *workshop* tenuto da SETAC a Sesimbra, in Portogallo, venne definita la struttura dell'LCA nelle quattro fasi iterative tuttora riconosciute dagli standard ISO (Curran, 2017).

Le fasi quattro fasi iterative che compongono un'analisi LCA sono:

1. Definizione degli scopi e degli obiettivi (*Goal and Scope definition*);
2. Analisi di Inventario (*Life Cycle Inventory, LCI*);
3. Valutazione degli impatti (*Life Cycle Impact Assessment, LCIA*);
4. Interpretazione (*Life Cycle Interpretation*).

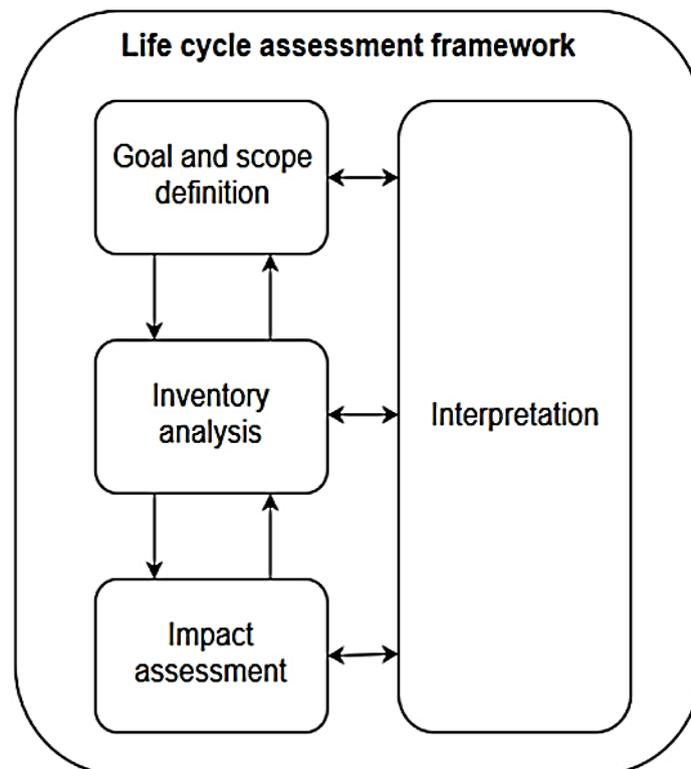


Figura 9 - Struttura dell'LCA ²⁴

²⁴ Fathollahi, A. & Coupe, S. J. Life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) of road drainage systems for sustainability evaluation: Quantifying the contribution of different life cycle phases. *Sci. Total Environ.* 776, 145937 (2021)

Nel seguente sotto capitolo verranno descritte nel dettaglio le quattro fasi dell'analisi LCA.

5.1.3 Fase 1: Definizione scopi ed obiettivi (Goal and Scope definition)

“L’obiettivo e il campo di applicazione devono essere definiti chiaramente e devono essere coerenti con l’applicazione prevista. In relazione con la natura iterativa dell’LCA, il campo di applicazione può essere ridefinito durante lo studio” (“UNI EN ISO 14044,” n.d.).

La *“Goal and Scope definition”* corrisponde alla prima fase della metodologia in cui vengono definiti:

- motivazioni, per fissare senza ambiguità le ragioni per cui lo studio è realizzato;
- campo di applicazione al fine di identificare l’ambito da analizzare in funzione degli obiettivi da perseguire. Infatti, il campo di applicazione deve essere ben definito per assicurare che l'ampiezza, la profondità ed il dettaglio dello studio possano essere compatibili con l'obiettivo dichiarato (“UNI EN ISO 14040,” 2006);
- tipologia di pubblico a cui è rivolto lo studio, cioè a chi devono essere comunicati i relativi risultati;
- unità funzionale (UF) che corrisponde alla quantificazione delle prestazioni di un dato servizio che definisce l’unità di riferimento dello studio rispetto alla quale tutti i dati in ingresso e in uscita sono normalizzati (1 kg di prodotto, 1kWh di energia, 1 tonnellata di rifiuti, ecc.). Permette inoltre di analizzare e confrontare i beni o i servizi;
- confini del sistema analizzato;
- requisiti di qualità dei dati;
- confronti fra sistemi;

- approccio attributivo o consequenziale, ovvero analisi della situazione media (dati medi) oppure analisi del cambiamento (dati marginali). A seconda dell'obiettivo dello studio possono essere individuate due tipologie di LCA: attributiva e consequenziale. L'LCA attributiva è definita dalla descrizione dei flussi fisici ambientali da e verso un ciclo di vita e i suoi sotto sistemi; l'LCA consequenziale è definita dall'obiettivo di descrivere come, flussi ambientali rilevanti, possono cambiare in seguito a specifiche decisioni (Finnveden et al., 2009);
- considerazioni sulla revisione critica (KlÃ and Grahl, 2014).

La scelta dei confini del sistema risulta particolarmente fondamentale in quanto determina quali processi unitari debbano essere inclusi nell'analisi. Tale selezione deve essere coerente con l'obiettivo dello studio e deve essere realizzata utilizzando criteri giustificati ("UNI EN ISO 14040," 2006). A questo proposito è bene chiarire le tipologie di confini che si possono adottare, ovvero:

- "Cradle-to-grave": valutazione "dalla culla alla tomba" che considera gli impatti in ogni fase del ciclo di vita di un prodotto, dal momento in cui le risorse naturali vengono estratte lavorate attraverso ogni fase successiva di produzione, trasporto, uso del prodotto e, infine, smaltimento (Figura 10).²⁵



Figura 10 - Fasi del ciclo di vita di un prodotto²⁶

²⁵ <https://www.eea.europa.eu/>

²⁶ <https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/sostenibilita/strumenti-di-sostenibilita/altri-strumenti/filosofia-del-ciclo-di-vita-lca>

- “*Cradle-to-gate*”: valutazione del ciclo di vita parziale del prodotto, dall'estrazione di risorse fino al cancello della fabbrica (vale a dire, prima di essere trasportato al consumatore). Le fasi di uso e smaltimento del prodotto sono escluse.
- “*Cradle-to-cradle*”: anche definito *closed loop production*, in cui il fine vita è il riciclo. Si tratta di un metodo utilizzato per ridurre al minimo l'impatto ambientale dei prodotti utilizzando sistemi sostenibili di produzione, funzionamento e smaltimento; mira ad incorporare la responsabilità sociale nello sviluppo dei prodotti (Figura 11).

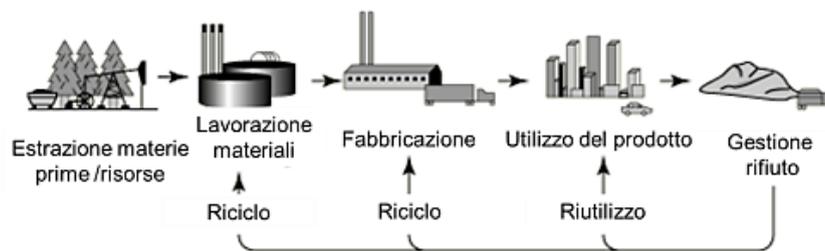


Figura 11 - Scenario "From cradle to cradle"²⁷

- “*Gate-to-gate*”: valutazione del ciclo di vita parziale che riguarda solamente un processo in tutta la catena di produzione. Andando ad effettuare i diversi studi *gate-to-gate* per i singoli processi produttivi si otterrà l'intera filiera.

Una volta definito il confine del sistema, si procede ad una rappresentazione grafica, tramite diagrammi di flusso, del processo in esame, in cui devono essere compresi i flussi di materia ed energia in entrata e in uscita dal sistema.

²⁷ Materiale didattico

5.1.4 Fase 2: Analisi di inventario (Life Cycle Inventory)

“La fase della valutazione del ciclo di vita che coinvolge la compilazione e la quantificazione degli input e degli output di un sistema di prodotto attraverso il suo intero ciclo di vita” (“UNI EN ISO 14040,” 2006).

Questa seconda fase dell’analisi LCA è la più laboriosa dal momento che lo scopo è quello di raccogliere i dati necessari e quantificare gli input e gli output di materia ed energia durante tutte le fasi prese in considerazione.

I dati utilizzati per l’analisi LCA possono essere di tipo primario o secondario. I dati primari sono quelli raccolti direttamente nel luogo di produzione tramite questionari o interviste, i dati secondari sono estrapolati da banche dati o dalla letteratura scientifica. Alcuni esempi di database LCA sono: *Plastic Europe*, *Ecoinvent*, *ELCD* o *Gabi*.

Entrambe le tipologie di dati devono rispettare, in relazione al grado di approfondimento dello studio, dei criteri di precisione, completezza, rappresentatività, consistenza e riproducibilità. Nel caso in cui i dati dovessero risultare incompleti o parziali, è possibile ricorrere alla formulazione di ipotesi e assunzioni, sempre giustificate da motivazioni pertinenti. Non vi sono metodi standardizzati ISO per valutare la qualità dei dati raccolti ma è bene verificare e citare sempre le fonti, la data a cui risalgono e riportarli con trasparenza.

Oltre alla raccolta dei dati, si procede anche alla quantificazione dei flussi di energia e materia che intercorrono tra i vari passaggi del sistema in esame; per quanto riguarda i flussi di energia, solitamente più complessi da riportare, si può eseguire un bilancio di massa ed energetico (Baldo, 2005).

Nel caso in cui nel sistema dovessero essere presenti dei co-prodotti o sottoprodotti, per poter ripartire ad ogni prodotto dell’impresa i flussi in ingresso ed in uscita corrispondenti, si può ricorrere all’ allocazione. La pratica più comune di allocazione prevede di attribuire i flussi sulla base della massa, quindi basandosi su relazioni fisiche (Baldo, 2005), ma è anche possibile proseguire eseguendo le attribuzioni

sulla base di relazioni economiche (“UNI EN ISO 14044,” n.d.); in entrambi i casi è importante adottare un approccio di allocazione logico, in linea con lo scopo dello studio, e spiegarlo chiaramente nel report conclusivo. La ISO 14044 raccomanda però di evitare questa pratica per limitare la possibilità di incorrere in semplificazioni o errori, conducendo una raccolta dati più dettagliata oppure rivedendo i confini del sistema.

5.1.5 Fase 3: Valutazione degli impatti (Life Cycle Impact Assessment)

“Fase della valutazione del ciclo di vita che ha l’obiettivo di comprendere e valutare la magnitudine e il significato dei potenziali impatti ambientali di un sistema di prodotto attraverso il suo ciclo di vita” (“UNI EN ISO 14044,” n.d.).

La terza fase è finalizzata a valutare e comprendere la grandezza degli impatti potenziali di un prodotto o sistema sull’ambiente, sulla base dei dati di inventario raccolti durante la fase precedente.

L’idea è di comprimere i dati in una lista più breve di categorie di impatto caratterizzate da specifici indicatori. Con il termine *“categoria di impatto”* o *midpoint* si intende una classe che rappresenta un problema ambientale (“UNI EN ISO 14040,” 2006) alla quale vengono assegnati i risultati del *Life Cycle Inventory*. A titolo d’esempio è possibile citare il cambiamento climatico. Per quantificare una *categoria d’impatto* si ricorre agli indicatori di categoria, come ad esempio il *“forcing radiativo”*, anche questi normati dalle ISO. Esistono poi i *fattori di caratterizzazione*, anch’essi normati dalle ISO, che derivano dai modelli di caratterizzazione e sono necessari per convertire i risultati del LCI in una unità comune; a titolo d’esempio è possibile citare il GWP (*Global Warming Potential*) che esprime il contributo all’effetto serra di un gas serra rispetto all’effetto provocato della CO₂.

La valutazione degli impatti si compone di quattro fasi principali:

1. classificazione;
2. caratterizzazione;

3. normalizzazione;
4. pesatura.

La prima fase prevede la *classificazione* in cui i dati di inventario vengono classificati in modo da capire su quali categorie di impatto abbiano un'influenza (Cavenago et al., 2021). La seconda fase prevede la *caratterizzazione* ovvero la quantificazione degli impatti ambientali che avviene attraverso l'applicazione dei fattori di caratterizzazione, aventi unità di misura comuni, ai risultati di inventario. (Cavenago et al., 2021).

Le due fasi appena descritte sono obbligatorie, a queste possono seguire altre fasi opzionali, le più frequenti sono normalizzazione e pesatura. La *normalizzazione* prevede di esprimere i risultati in relazione ad un sistema di riferimento. Tale procedura permette di esprimere i risultati relativi alle diverse categorie d'impatto comparabili tra loro, facilitandone così la comunicazione e comprensione. Infine, la pesatura permette di stabilire l'importanza relativa di ogni categoria d'impatto rispetto alle altre, attraverso l'attribuzione di pesi (Cavenago et al., 2021). Le ultime due fasi descritte possono facilitare la compressione dei risultati, tuttavia, non sono universalmente riconosciute dalla comunità scientifica poiché prevedono un elevato grado di incertezza e potrebbero dunque portare a valutazioni poco oggettive.

La valutazione degli impatti ambientali può essere realizzata attraverso l'applicazione di diversi metodi disponibili nei software LCA. Uno dei metodi più utilizzati a livello internazionale è il metodo di calcolo *ReCiPe*. *ReCiPe* permette di condurre due livelli di analisi: *midpoint* ed *endpoint*. A livello *midpoint* sono definite 18 categorie d'impatto, aggregate a livello *endpoint* in 3 categorie principali, relative a salute umana, risorse ed ecosistemi.

5.1.6 Fase 4: Interpretazione

“È la fase dell’LCA in cui i risultati dell’analisi di inventario e di valutazione di impatto sono considerati assieme o, nel caso di uno studio di LCI, solo i risultati dell’analisi di inventario. La fase di interpretazione deve consegnare risultati che siano consistenti rispetto agli obiettivi e al campo di applicazione definito, quali conclusioni

sono state raggiunte, esporre le limitazioni e fornire raccomandazioni” (“UNI EN ISO 14040”, 2006).

L’ultima fase che caratterizza l’analisi LCA prevede l’interpretazione dei risultati. In questa fase vengono identificati i contributi più significativi analizzando i risultati di inventario e di valutazione degli impatti, individuando le fasi del ciclo di vita più impattanti. Seconda la norma ISO 14044 si deve valutare lo studio anche in termini di:

1. completezza: per assicurarsi che tutti i dati e le informazioni rilevanti siano disponibili e complete;
2. sensitività: al fine di valutare l’affidabilità dei risultati;
3. consistenza: per verificare se le assunzioni, i metodi e i dati sono in linea con gli obiettivi e le finalità.²⁸

Al termine di tali pratiche si giunge alla definizione delle conclusioni finali, includendo nella valutazione la limitazione dello studio e le raccomandazioni future, il tutto riportato all’interno di un report finale.

5.2 Software e database LCA

5.2.1 Software SimaPro

Lo sviluppo di un’analisi LCA avviene tramite l’utilizzo di un *software* specifico che permette, a partire dall’elaborazione dei dati di inventario del sistema in esame, di effettuare il calcolo degli impatti. Esistono diversi software LCA che possono essere scelti in base all’obiettivo dello studio e alle caratteristiche del sistema da analizzare. Per lo studio oggetto di questa tesi, è stato scelto il *software* SimaPro (System for Integrated Environmental Assessment of Products), uno dei *software* più utilizzati a livello internazionale. È stato sviluppato dalla società olandese PRè (Product Ecology Consultants - NL) per conto del ministero dell’ambiente olandese nel 1990 e ad oggi viene utilizzato in più di 80 paesi.

²⁸ Materiale didattico

L'obiettivo principale di questo *software* è quello di approfondire materiali e processi che individuano elementi di maggior impatto ambientale andando a lavorare sull'ottimizzazione dei processi più critici per migliorarne le prestazioni ambientali (Goedkoop and AI, 2016). Il *software* facilita la raccolta, l'analisi e il monitoraggio dei dati e consente di valutare le prestazioni ambientali di un sistema di prodotto. Le analisi sono schematiche, trasparenti, coerenti e possono riguardare cicli di vita anche piuttosto complessi con la costruzione di scenari molto articolati (Goedkoop and AI, 2016). L'utilizzo del *software* consente di identificare i punti di debolezza nell'intera catena di fornitura, ma anche di eseguire analisi specifiche come l'allocazione, in caso di prodotti multipli o co-prodotti, o l'analisi dell'incertezza (Goedkoop and AI, 2016). All'interno del *software* SimaPro è possibile disporre di diverse banche dati come *Ecoinvent*, BUWAL 250 e IVAM, relativi a varie categorie: energia (petrolio, gas naturale, carbone, lignite, energia nucleare, fotovoltaico, energia solare, ecc.), trasporti, materiali da costruzione, prodotti chimici, elettronici, meccanici, carta, materie plastiche, sistemi di smaltimento e trattamento dei rifiuti. Un altro aspetto interessante è la sua flessibilità; infatti permette di modificare e adattare al caso di studio i processi ed i materiali già esistenti nel *database* ma anche crearne alcuni ex novo (Goedkoop and AI, 2016).

In questo caso il *database* utilizzato è *Ecoinvent*, una delle banche dati più complete e utilizzate, soprattutto a livello Europeo.

5.2.2 Database Ecoinvent

I software LCA dispongono di diverse banche dati europee e internazionali di supporto per la fase di inventario. In SimaPro tra le banche dati disponibili c'è *Ecoinvent*, sviluppato dal centro di ricerca svizzero "*Swiss Centre for Life Cycle Inventories*". Tale *database* è composto da oltre 4000 processi relativi a servizi, prodotti e processi (Ecoinvent, 2007) relativi a diversi settori, come ad esempio trasporti, prodotti chimici, materiali da costruzione, l'agricoltura, ecc. (Goedkoop and AI, 2016). Le informazioni contenute nel *database* sono state sviluppate attraverso il lavoro integrato di diverse istituzioni svizzere e derivano dalle medie dei dati ottenuti dalle ricerche svolte a livello internazionale o europeo e, dove possibile, a scala di singolo stato. Tutti i dati presenti

nel *database* sono aggiornati periodicamente e supportati da una documentazione dettagliata che permette di indagare ulteriormente il dato fornito e di constatare la qualità dello stesso (Frischknecht et al., 2007).

5.3 Caso di studio

Il caso in esame è relativo allo scavo di un tunnel nei pressi del ramo occidentale del lago di Como, più precisamente nei territori che vanno da Colonno (CO) a Griante (CO) per la realizzazione di una variante ad una strada statale già esistente, che è stato curato per la parte di progettazione e valutazione degli aspetti di impatto ambientale (nel rispetto delle procedure di VIA) da Nexteco s.r.l.

Nell'ambito di questo lavoro, è stato sviluppato uno studio LCA relativo a diversi scenari di gestione di materiali, soprattutto rocce e terre che a partire dal sito di produzione vengono inviate verso i siti di destino (per essere recuperate, trattate o smaltite), allo scopo di valutare sia gli impatti legati al trasporto che al "fine vita" di questi materiali.

I dati relativi alle volumetrie interessate fanno riferimento a dati progettuali. Per quanto riguarda i siti di destino sono state fatte delle assunzioni relative alla localizzazione e al trasporto, inteso non solo in termini di distanze ma anche di tipologie di mezzi di trasporto interessati. In particolare, sono state ipotizzate tre diverse opzioni di "fine vita" per i materiali e quattro scenari di trasporto. Tutte le opzioni presentate sono conformi alla normativa vigente e pertanto, lecitamente perseguibili.

Molte delle considerazioni che deriveranno dallo studio sono di interesse sia relativamente alla comparazione di scenari relativa al caso specifico affrontato, sia per considerazioni generali che potranno essere ricavate e da ritenersi valide anche per progettazioni future che prevedano fasi di lavoro analoghe.

5.3.1 Descrizione del progetto

Nel seguente capitolo viene illustrato il progetto della "S.S. 340-*REGINA*" Variante alla *Tremezzina*" opera che si snoda in direzione SW-NE, nell'ambito del territorio di Como, sul versante occidentale dell'omonimo lago, per una lunghezza complessiva di

circa 9,9 km, nel tratto compreso tra Colonno, a Sud, e Griante, a Nord, interessando anche i territori di Sala Comacina, Ossuccio, Lenna, Mezzegra, Azzano e Tremezzina (Nexteco, 2022).

Lungo la riva occidentale del Lario si snoda la “Strada Regina”, famosa per i luoghi che collega, per le ville ed i parchi che la fiancheggiano, per le visuali panoramiche che mostra a chi la percorre.

L’importanza di questa arteria, dal punto di vista dei collegamenti è dovuta al fatto che essa rappresenta un itinerario di primario interesse sia per i collegamenti interni alla provincia che per le relazioni internazionali verso la Svizzera e quelle nazionali verso Valtellina e Val Chiavenna ²⁹.



Figura 12 - Tracciato galleria Tremezzina ³⁰

Il progetto comprende opere in sotterraneo, ovvero le gallerie principali, di svincolo e di servizio, opere a cielo aperto, quali viadotti e ponti, ed opere di cantierizzazione. In Tabella 1 sono riportate le principali opere in sotterraneo.

²⁹ <https://www.provincia.como.it/variante-tremezzina>

³⁰ Progettazione esecutiva ed esecuzione dei lavori dell’intervento: “S.S. 340 “REGINA” – VARIANTE ALLA TREMEZZINA”, PUT

Tabella 1 - Opere in sotterraneo

Gallerie asse principale	Gallerie di svincolo	Gallerie di servizio
Galleria naturale Comacina; (imb lato Como; imb lato Menaggio)	Svincolo di Colonno (imb lato Como; imb lato Menaggio)	Galleria di Servizio Comacina (imb lato Como; imb lato Menaggio)
Galleria naturale Perlana (imb lato Como; imb lato Menaggio)	Svincolo di Griante (imb lato Como; imb lato Menaggio)	Galleria di Servizio Perlana (imb lato Como; imb lato Menaggio)
Galleria naturale Bonzanigo (imb lato Como; imb lato Menaggio)		Galleria di Servizio Tremezzina (imb lato Como; imb lato Menaggio)
Galleria naturale Tremezzina (imb lato Como; imb lato Menaggio)		

Le principali opere a cielo aperto sono riportate in Tabella 2:

Tabella 2 - Opere a cielo aperto

Ponte sul Torrente Perlana
Ponte sul Torrente Perlana
Ponte sul Torrente Azzano

Sono previsti dei siti di cantierizzazione, in particolare cantieri base ed operativi:

Tabella 3 - Siti di cantierizzazione

Cantieri di base	Cantieri operativi
Cantiere di base 1 di Grandola e Uniti – area Nord	Cantiere operativo Nord – svincolo di Griante;
Cantiere di base due di Castiglione Intelvi – area Sud	Cantiere operativo Sud – svincolo di Colonno
Cantiere di servizio di Grandola e Uniti – area Nord	Cantiere operativo viadotto Azzano

A Sud l'intervento prevede la deviazione del traffico all'altezza di Colonno, con un'immissione in galleria e restituzione sulla litoranea presso Griante. Il nuovo tracciato prevede quattro gallerie principali, Comacina, Perlana, Bonzanigo e Tremezzina e un attraversamento dell'incisione presso il torrente Perlana mediante viadotto. Le tre gallerie di maggiore lunghezza Comacina, Perlana e Tremezzina sono dotate di cunicolo di sicurezza posto a monte, parallelamente all'asse principale. Il sistema di viabilità prevede anche due svincoli a inizio (Colonno) e fine (Griante) lotto, utili alla gestione temporanea della viabilità. Dette opere saranno poi mantenute nella configurazione definitiva (Nexteco, 2022).

Al fine di dare un generale inquadramento dell'intervento di cui trattasi, in Figura 13 si riporta il tracciato planimetrico della nuova opera con l'indicazione delle gallerie, degli svincoli di raccordo con la viabilità attuale e delle cabine elettriche.

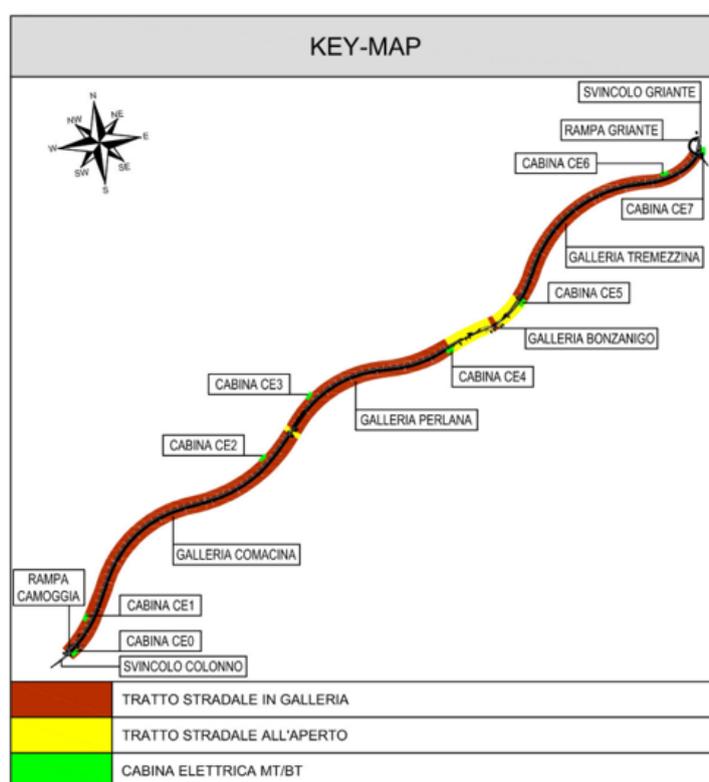


Figura 13 - Tracciato galleria Tremezzina ³¹

³¹ Progettazione esecutiva ed esecuzione dei lavori dell'intervento: "S.S. 340 "REGINA" – VARIANTE ALLA TREMEZZINA", PUT

Le tecniche di scavo utilizzate per l'esecuzione dei lavori sono il tradizionale, che comprende i metodi di scavo con:

- esplosivo;
- mezzo meccanico ad attacco puntuale (senza impiego di macchine a scavo continuo, ad esempio martelloni);

e lo scavo meccanizzato che avviene utilizzando frese ad attacco integrale e continuo, generalmente del tipo di TBM aperte, TBM monoscudo, TBM doppio scudo. L'acronimo TBM sta per Tunnel Boring Machine, ma il mezzo può essere anche definito "fresa meccanica". È possibile suddividere una TBM in due macroaree: la parte anteriore è definita testa rotante, detta anche fresante, con diametro pari a quello della galleria, sulla quale sono montati picchi o dischi che effettuano l'azione di scavo vera e propria; questa può essere scudata o meno, in pressione o meno. La parte posteriore viene definita carro ed in esso trovano posto tutti gli apparati logistici. È possibile individuare una cabina di comando centrale, dalla quale vengono gestite tutte le operazioni e vengono continuamente monitorati i parametri di scavo e relativi al materiale presente.

5.3.2 Geologia ed idrogeologia

L'area di progetto si inserisce in un settore della catena alpina denominato "Alpi Meridionali", costituito da un substrato litoide rappresentato da una potente successione marina di tipo prevalentemente carbonatico di età triassico-oligocenica. Lungo lo sviluppo delle opere la successione del substrato risulta perlopiù organizzata con polarità normale, ovvero con i termini più antichi in basso, a costituire la parte inferiore del versante e i termini più recenti in alto. Tuttavia, l'assetto tettonico della regione determina alcune modifiche a questa normale situazione (Nexteco, 2022).

L'assetto idrogeologico è più o meno direttamente collegato alla problematica del carsismo. Molte delle formazioni del substrato, con l'eccezione delle Argilliti di Riva di Solto e del Calcere di Zu presentano elevata predisposizione al carsismo o semplicemente al micro-carsismo, ovvero a fenomeni di dissoluzione diffusa lungo stratificazione e fratture che determinano significativi incrementi del grado di permeabilità (Nexteco, 2022).

La presenza di formazioni con livelli marnosi intercalati a quelli carbonatici può creare compartimentazioni locali; tuttavia, all'interno del versante in esame esistono significativi indizi di importanti circolazioni. Tali indizi sono costituiti principalmente dalla presenza di gruppi di sorgenti molto produttive. Le sorgenti più importanti della zona sono legate a circolazioni che avvengono nelle formazioni dell'Albenza, Sedrina e Moltrasio e che emergono al contatto con il Calcare di Zu. Tra queste si ricordano le sorgenti Casgnola, Folla, Acquafredda, Coslino e Sartorio, che complessivamente, pur non essendo disponibili dati di monitoraggio certi, forniscono portate dell'ordine dei 50-100 l/s (Nexteco, 2022).

5.3.3 Indagini pregresse

Tra il 2013 e il 2019 è stata condotta una campagna di indagini, affidata ad un laboratorio selezionato che aveva l'obiettivo di valutare le opportunità di riutilizzo dei materiali scavati. Sono stati raccolti 32 campioni tramite carotaggio in diversi punti, mostrando quindi caratteristiche rocciose differenti tra loro. I test condotti sulle carote sono analisi chimiche del materiale e test di cessione; queste ultime sono delle prove simulate di rilascio di contaminanti effettuate ponendo in contatto per un tempo definito, un solido con un lisciviante e separando quindi le due fasi per ottenere un eluato. Nel rispetto di quanto previsto dalla normativa, come liscivianti sono stati utilizzati acido acetico o acqua satura di CO₂³².

A seguito delle analisi è apparso che tutti i campioni fossero conformi al test di cessione nei limiti della tabella 2, allegato 5 al titolo V del D.Lgs 152/06 e ss.mm.ii., per quanto riguarda le analisi sul contenuto totale, 7 campioni non sono risultati conformi alle CSC (concentrazioni soglia di contaminazione indicate in tabella 1, allegato 5 al titolo V d.lgs. 152/06) (5 per superamento delle concentrazioni di Arsenico in colonna A e 2 per superamento di concentrazioni di Idrocarburi pesanti sempre in colonna A). Colonna A e B si riferiscono rispettivamente a siti destinati ad uso di verde pubblico e privato o residenziale (colonna A), e siti ad uso commerciale ed industriale (colonna B); dunque,

³² 29 gennaio 2015 Ricerca, siti inquinati e sistema nazionale per la protezione dell'ambiente Il test di cessione sul materiale di riporto: presentazione del protocollo condiviso per il SIN di Sesto San Giovanni e proposte di trattazione dei dati dott. geol. Madela Torretta – ing. Sara Puricelli

ne deriva che i limiti di concentrazione in colonna A siano più stringenti rispetto a quelli in colonna B (Nexteco, 2022).

Analisi analoghe sono state realizzate, con i medesimi protocolli analitici, per campioni di rocce e terreni provenienti dai sondaggi eseguiti nel corso della progettazione definitiva. I valori riscontrati dai test di cessione e dalle analisi chimiche sui terreni (contenuto totale) sia per i campioni in roccia sia per i campioni di terreno, rientrarono sia nei limiti di tabella 2 che di tabella 1 colonna A, allegato 5 del D.Lgs 152/06 e ss.mm.ii. (Nexteco, 2022).

Alla luce di queste risultanze è stato effettuato un approfondimento d'indagine finalizzato a definire le anomalie riscontrate in fase di caratterizzazione preliminare e determinarne la causa al fine di poter poi gestire correttamente lo smaltimento delle terre e rocce da scavo. Pertanto, sono state effettuate nuove analisi specifiche per gli idrocarburi su ulteriori campioni e per l'arsenico, che hanno portato nel 2019 a non avere nessun campione con superamento delle CSC (Nexteco, 2022).

Nell'anno 2021 è stata realizzata una campagna di indagini integrative a corredo della progettazione esecutiva; per quanto riguarda la caratterizzazione ambientale dei materiali di scavo, sono stati effettuati due prelievi di campioni in zona Griante, a diverse profondità. Il primo, CR1, ad una profondità di 26–27 m, e il secondo, CR2, ad una profondità di 47–48 m (Nexteco, 2022).

1. CR1, supera le CSC di colonna A, Tab.1, All.5, al tit. V, parte IV, D.Lgs. 125/2006 e ss.mm. ii per i seguenti elementi: arsenico, cobalto, cromo totale, nichel, rame, zinco, mentre supera le CSC di colonna B per l'arsenico.
2. CR2, supera le CSC di colonna A, Tab.1, All.5, al tit. V, parte IV, D.Lgs. 125/2006 e s.m.i. per i seguenti elementi: cobalto, arsenico, cromo totale, nichel, piombo, rame, zinco mentre supera le CSC di colonna B per i seguenti elementi: arsenico, cromo totale, nichel.

Si può affermare che le concentrazioni di As ritrovate nei terreni della tratta finale del progetto siano ascrivibili al fondo naturale che caratterizza i limi glaciali lacustri ivi presenti (Nexteco, 2022).

Rispetto a tale profilo di qualità ambientale, sono stati ipotizzati destini specifici per i materiali di scavo, prevedendo che una percentuale di essi (coerentemente con le risultanze ottenute in fase di caratterizzazione) non potesse essere destinata a opzioni di recupero, ma andasse smaltita come rifiuto a causa della contaminazione presente.

5.3.4 Volumetrie

In Tabella 4 sono riportati i cosiddetti “volumi in banco” previsti, ossia una stima dei quantitativi di materiali da scavare che non tiene conto di eventuali coefficienti di rigonfiamento che si manifestano all’atto della rimozione e riallocazione del materiale sciolto nei depositi predisposti (ossia “fuori banco”). Tali volumi sono suddivisi in “nord” e “sud” a seconda di quale sarà il deposito in cui sono destinati.

Tabella 4 - Volumi totali in banco

	Volume in banco m ³		
	Nord	Sud	Totale
Volume totale	767.895	1.257.300	2.025.196
Volume totale dallo scavo in sotterraneo	587.601	1.097.242	1.684.846
Fabbisogno interno (cls)	271.652	377.437	649.089
Fabbisogno interno (altri riutilizzi)	185.030	196.525	381.556
Materiali in esubero	302.213	683.338	985.551
Materiale da gestire potenzialmente come rifiuto	9000		

Come sopra citato, circa 9000 m³ di materiale scavato sono destinati ad essere rifiuti dal momento che superano le CSC. Dunque, il volume totale in banco oggetto dello studio ammonta a 2.016.196 m³.

Questa volumetria verrà trasportata all’esterno del sito di scavo; una parte verrà destinata al riutilizzo interno, dunque, dopo essere stata sottoposta a vagliatura, frantumazione ed asciugatura in un impianto dedicato, tornerà al sito di partenza; la restante parte verrà destinata ai siti finali dove verrà re impiegata per diversi scopi. In particolare, si può notare dalla Tabella 5 come:

- 985.551 m³ verranno allontanati definitivamente dal sito di produzione;

- 649.089 m³ verranno allontanati dal sito di produzione per essere trattati e poi vi faranno ritorno.

Tabella 5 - Materiali da conferire ai siti di destinazione definitivi

Materiale da conferire in siti di destinazione definitivi	Volume in banco [m ³]		
	Nord	Sud	Totale
Utilizzo esterno al cantiere	302.213	683.338	985.551
Utilizzo interno per produzione di cls	271.652	377.437	649.089
TOTALE	573.865	1.060.775	1.634.640

Una volta estratti dalla parete rocciosa, i materiali verranno trasportati e verrà considerato un coefficiente di rigonfiamento a seguito dell'estrazione. Per il computo dei volumi effettivi di materiale da conferire ai siti di destinazione finale, tenendo conto anche dell'aumento di volume, è stata fatta la seguente considerazione:

- è stato applicato ai volumi in banco un coefficiente di rigonfiamento pari a 1,5 medio, per il passaggio da materiale in banco a materiale sciolto. Tale coefficiente appare idoneo considerando che il materiale viene lavorato tal quale dopo lo scavo/trasporto e deposito prima della lavorazione.

Il volume da conferire esternamente al cantiere è pari a 1.342.217 m³, considerando il rigonfiamento cui andranno incontro, di cui:

- 394.212 m³ conferibili dal portale nord;
- 948.005 m³ conferibili dal portale sud.

Tali volumi sono stati successivamente presi in considerazione per lo studio LCA condotto e descritto di seguito.

5.3.5 Modellizzazione in SimaPro

Al fine di quantificare gli impatti ambientali mediante un approccio LCA è necessario modellizzare gli scenari di gestione delle terre e rocce da scavo per i quali sono previste le operazioni di movimentazione, trasporto e gestione finale dei materiali. Tali scenari devono essere scomposti in operazioni unitarie alle quali devono essere

associate i processi LCA più rappresentativi presenti nel database *Ecoinvent*. La modellizzazione è stata eseguita individuando dapprima gli scenari complessivi di trasporto e di gestione, successivamente questi sono stati scomposti in singole componenti per le quali poi, sono stati individuati con precisione i singoli elementi costitutivi (e.g. mezzi d'opera, mezzi di trasporto, materie prime). L'individuazione dei processi LCA necessari per la modellizzazione degli elementi ha comportato un'attenta analisi dei processi disponibili nel database *Ecoinvent*.

5.3.5.1 Opzioni di gestione dei materiali di scavo

In base alle caratteristiche geotecniche ed alle proprietà chimiche e fisiche, ciascun materiale proveniente dallo scavo delle opere in progetto, può essere adibito ad un riutilizzo all'interno e/o all'esterno del cantiere, secondo la normativa vigente. Ma vi sono variabili influenti sulla gestione dei materiali che possono anche avere a che fare con l'effettiva disponibilità di spazi nei siti di destino e/o altre prescrizioni specifiche relative al progetto in esame. Nel caso del presente studio, tra le opzioni di valorizzazione dei materiali sono state prese in considerazione:

- destino a discarica per inertii;
- conferimento ad impianto di trattamento;
- materiali da utilizzare per interventi di ripristino ambientale.

Nel caso di specie, sono state individuate specifiche soluzioni che rispondessero a criteri di adeguatezza dal punto di vista normativo (ovvero in possesso delle autorizzazioni necessarie) e di vicinanza geografica (scegliendo il sito adeguato più vicino possibile), pertanto le opzioni individuate nello specifico sono state:

- per il conferimento a discarica è stato individuato il sito di Via Porta C 30, Cesena Brianza ³³;
- per la preparazione al riutilizzo è stato individuato l'impianto dedicato (Via Porlezza 63, Rescia);

³³ <https://inertisrl.net/>

- quanto al riutilizzo per ripristino morfologico di siti ambientali è stata individuata la Cava Sinergia Uno, Via per Guanzate 40, Bulgarograsso.

MODELLIZZAZIONE DEL CONFERIMENTO A DISCARICA

Per quanto concerne lo smaltimento in discarica, ad oggi, questo rappresenta la scelta meno indicata per il conferimento di materiali a causa della scarsa sostenibilità del processo. Proprio per questo motivo tale scenario è stato scelto per essere valutato, al fine di rappresentare il “*worst case*”.

La modellizzazione di questa opzione di gestione prevede un solo elemento già presente in *Ecoinvent* che racchiude al suo interno tutti gli input (materie prime, energia) e output (emissioni) relativi alla gestione di una discarica che può accogliere rifiuti inerti.

MODELLIZZAZIONE DELLA PREPARAZIONE PER IL RIUTILIZZO

Negli impianti che trattano rifiuti inerti provenienti dalle attività di costruzione e demolizione, i rifiuti conferiti vengono sottoposti ad una serie di processi fisici e meccanici di selezione, macinazione e vagliatura da cui si producono sottoprodotti di diverse classi dimensionali (Borghi et al., 2017).

L'impianto preso in esame nel seguente caso di studio è situato Via Porlezza 63, Claino con Osteno (CO) ed è costituito da 5 aree: impianto di produzione di calcestruzzo, impianto di produzione inerti naturali - impianto di produzione a secco, impianto di produzione inerti naturali - impianto di produzione ad umido, impianto di trattamento e recupero dei rifiuti ed impianto di produzione di miscele bituminose. In particolare, il focus sarà posto sull'impianto di produzione inerti naturali - produzione ad umido il cui scopo è l'ottenimento di un materiale a granulometria molto fine.

Le fasi di tale processo sono le seguenti:

1. il materiale naturale (terre e rocce da scavo) stoccato in area dedicata adiacente alla tramoggia di carico, viene caricato nella tramoggia principale collegata al frantumatore dove giunge per caduta;

2. in uscita dal frantumatore, posto in area coperta, il materiale sgrossato viene trasportato con due nastri principali in serie alla sfangatrice dove con l'ausilio dell'acqua proveniente dalla vasca di accumulo/recupero della filtro pressa, con integrazione se necessario di acqua prelevata da acquedotto, il materiale subisce una prima fase di lavaggio;
3. in uscita dalla sfangatrice il materiale viene mandato su un sistema di vagli vibranti posti in verticale con dimensioni variabili (vaglio con apertura maggiore posto in alto e a seguire vagli via via con dimensione decrescente) dove, grazie all'ausilio di acqua distribuita sui vagli tramite ugelli, viene separato nelle varie pezzature (in uscita da ogni vaglio è presente un nastro trasportatore che avvia le varie pezzature alle zone di stoccaggio nel piazzale);
4. il materiale che viene trattenuto dal vaglio con maglie di dimensioni maggiori raggiunge per caduta il mulino di frantumazione posto nell'area sottostante per essere ridotto di dimensioni;
5. in uscita dal mulino un nastro trasportatore riporta il materiale al nastro principale convogliandolo al materiale proveniente dal frantumatore. Il materiale viene riportato quindi alla sfangatrice e di seguito ai vagli. Il ciclo continua fino a quando il materiale non viene ridotto alla dimensione adeguata.

Ai fini del presente studio sono state effettuate delle semplificazioni tali per cui è stata modellizzata in *SimaPro* una filiera di trattamento che prevede la sequenza di frantumazione, vagliatura a secco seguita da lavaggio e vagliatura a umido finale.

MODELLIZZAZIONE DEL RIUTILIZZO COME SOTTOPIRODOTTO (RIPRISTINO AMBIENTALE)

Il ripristino ambientale è la pratica più semplice dal punto di vista delle operazioni necessarie, i siti interessati e che sono i più comuni destinatari dei materiali da scavo sono soprattutto le cave esaurite, ma anche le miniere e altre zone estrattive (Puglisi, 2006).

L'obiettivo è quello di ottenere un vero e proprio ripristino della zona sotto il profilo naturalistico, senza trascurare la mitigazione dell'impatto visivo. Infatti, un recupero tecnicamente riuscito dal punto di vista ambientale lo è sicuramente anche da

quello estetico - paesaggistico. Le tecniche di intervento sono molteplici e diversificate in funzione della tipologia e della zona della cava da recuperare. Per la scelta dell'intervento in questo ambito antropizzato, già coltivato in passato, sono stati analizzati diversi fattori, quali:

- a. l'ubicazione della cava;
- b. l'orografia (altitudine, esposizione e pendenza);
- c. la pedologia;
- d. il clima e il livello di falda freatica;
- f. la forma e le dimensioni della cava;
- g. l'inclinazione delle pareti del fronte di cava;
- h. il contesto ambientale e paesaggistico.

Il piano di recupero ambientale si pone quindi l'obiettivo di ricreare le condizioni di vita del paesaggio originario così da favorire l'insediamento delle componenti vegetali e animali tipiche della zona.

Nel caso studio qui riportato si farà riferimento alla cava Sinergia 1 - Gruppo Foti come sito di ripristino ambientale, situata in Via per Guanzate 40, Bulgarograsso; verranno riportati gli impatti relativi ai principali mezzi d'opera che vengono solitamente impiegati in questi progetti per cui si ipotizza l'utilizzo di un camion 3 assi, un escavatore, un rullo compattatore ed una pala gommata.

5.3.5.2 Opzioni di trasporto

Per raggiungere i tre siti di destino, sono state individuati sei diversi percorsi. Tra questi, cinque prevedono uno spostamento dei materiali solo via gomma mentre uno prevede anche una tratta via lago.

È stato ipotizzato un trasporto esclusivamente via gomma dai due svincoli, Griante a Nord e Colonna a Sud, verso i siti di destino. In particolare, si prevede l'utilizzo di un camion bilico per l'intera percorrenza, il quale verrà caricato presso il cantiere e scaricato presso il sito finale da due escavatori.

Sempre per quanto riguarda i mezzi a terra, sono stati anche modellizzati due camion tre assi presenti nei cantieri e nel sito finale per la movimentazione interna dei materiali.

È stata ipotizzata anche un'opzione per la tratta da Nord che preveda alcuni km percorsi via lago su di una chiatta al fine di verificare le performance ambientali anche di questa particolare opportunità. Gli inerti percorreranno una breve distanza via camion fino all'arrivo al punto di approdo, da qui la chiatta seguirà la tratta via lago, infine il percorso verrà proseguito tramite camion fino al sito di destino finale.

5.3.5.3 Descrizione degli scenari di trasporto e gestione confrontati

Vengono illustrati di seguito i quattro scenari di trasporto e gestione dei materiali da scavo selezionati e modellizzati che verranno analizzati in SimaPro. Ogni scenario, quindi, include la fase di trasporto interno al sito di produzione, il carico sul mezzo di trasporto, il trasporto stesso e la fase di trattamento/gestione che si realizza nel sito di destino finale. I 4 scenari sono stati scelti in modo tale da poter confrontare le opzioni presenti tra un ipotetico best case, ovvero la migliore combinazione in termini di impatti ambientali, e il worst case ovvero la peggiore.

Lo scenario A e lo scenario B prevedono il trasporto dei materiali inerti dai due svincoli alla discarica, ubicata in Via Porta C 30, Cesena Brianza.

Lo **scenario A** prevede lo spostamento dei materiali via gomma, sia da Nord che da Sud. I due percorsi individuati sono riportati nelle figure sottostanti e si snodano per 51,8 km e 42,1 km, rispettivamente da nord e da sud. I mezzi d'opera individuati sono, anche in questo caso, quattro escavatori per il carico e lo scarico degli inerti, due camion bilico per la percorrenza dell'intero percorso e due camion tre assi per la movimentazione interna al cantiere precarico.

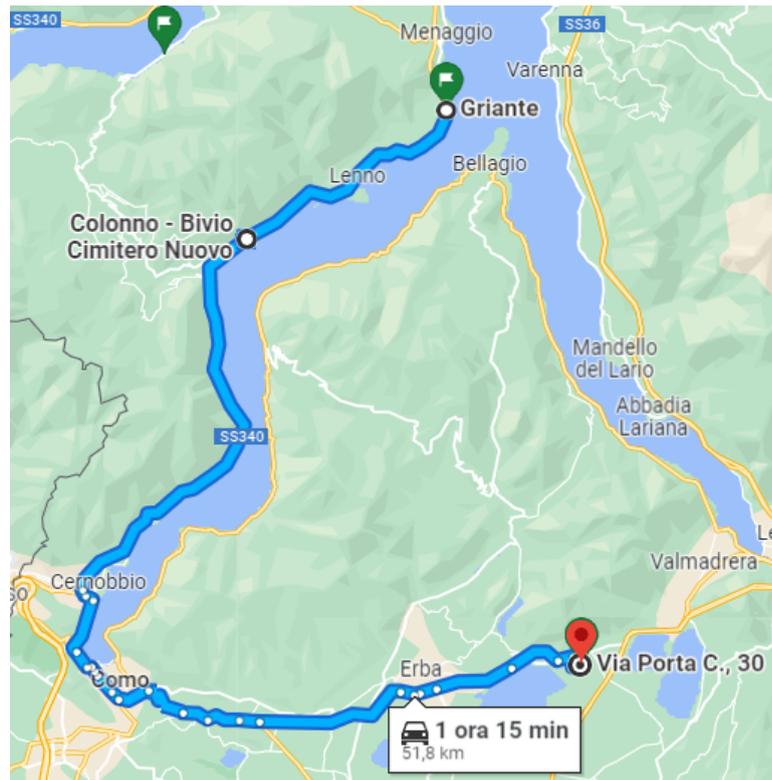


Figura 14 - Trasporto scenario A Nord

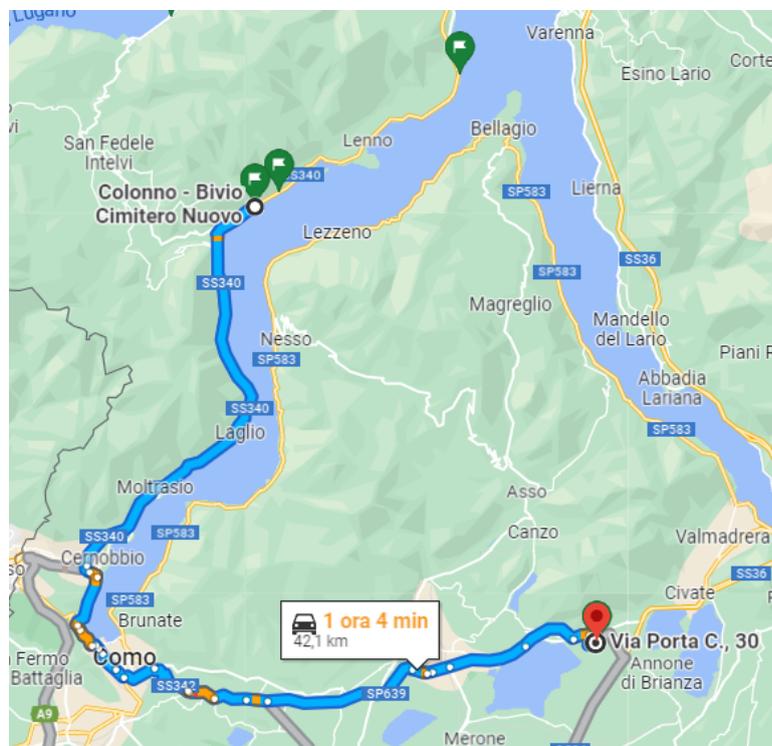


Figura 15 - Trasporto scenario A Sud

Per quanto riguarda il trattamento vero e proprio è stato utilizzato un processo già presente in Ecoinvent rappresentativo della gestione dei materiali in discarica.

Lo **scenario B** è simile allo scenario A, ma prevede una variante limitatamente al trasporto dallo svincolo a Nord (Griante). Per questa alternativa, infatti, si prevede un passaggio di 2,6 km via lago con l'utilizzo di una chiatta trainata da un rimorchiatore e la presenza aggiuntiva di un escavatore che provveda a scaricare la chiatta e caricare il camion. Dal punto di approdo il materiale viene trasferito all'interno di un camion 3 assi che percorrerà 27,3 km fino a raggiungere il sito di destino finale.

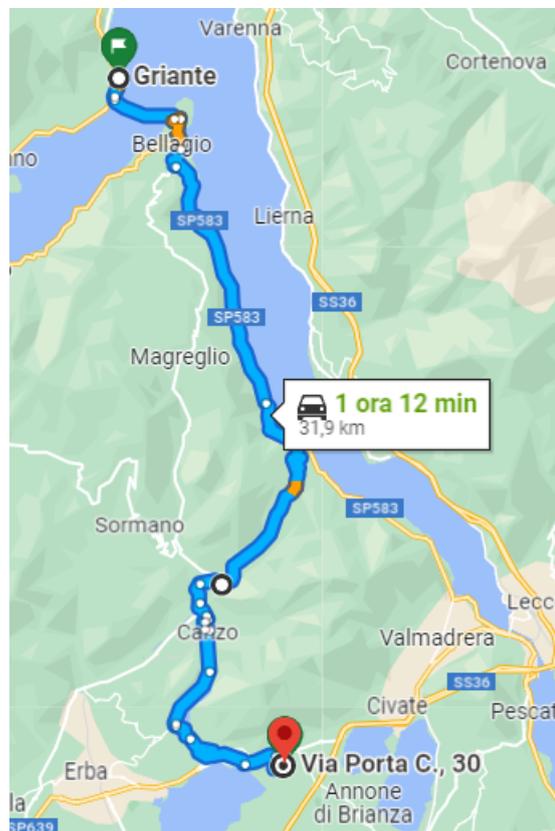


Figura 16 - Trasporto scenario B Nord

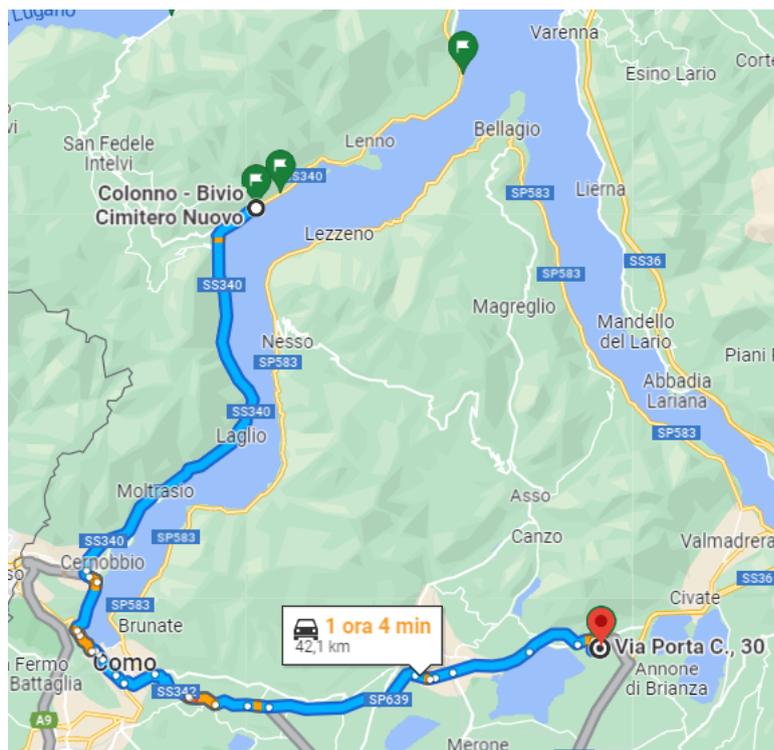


Figura 17 - Trasporto scenario B Sud

Lo **scenario C** prevede il trasporto dei materiali scavati, dallo svincolo Nord e dallo svincolo Sud ad un impianto di trattamento realmente esistente. L'impianto scelto è ubicato in Via Porlezza 63, situato nella frazione di Rescia nel Comune di Claino con Osteno (CO).

In questo caso i trasporti, da Nord e da Sud, avvengono via gomma, quindi sono stati modellizzati quattro escavatori, due per il carico e due per lo scarico dei materiali, due camion bilico per il trasporto e due camion tre assi per la movimentazione interna al cantiere precarico. I due spostamenti sono riportati nelle figure sottostanti e sono lunghi rispettivamente 17,5 km e 19,9 km.

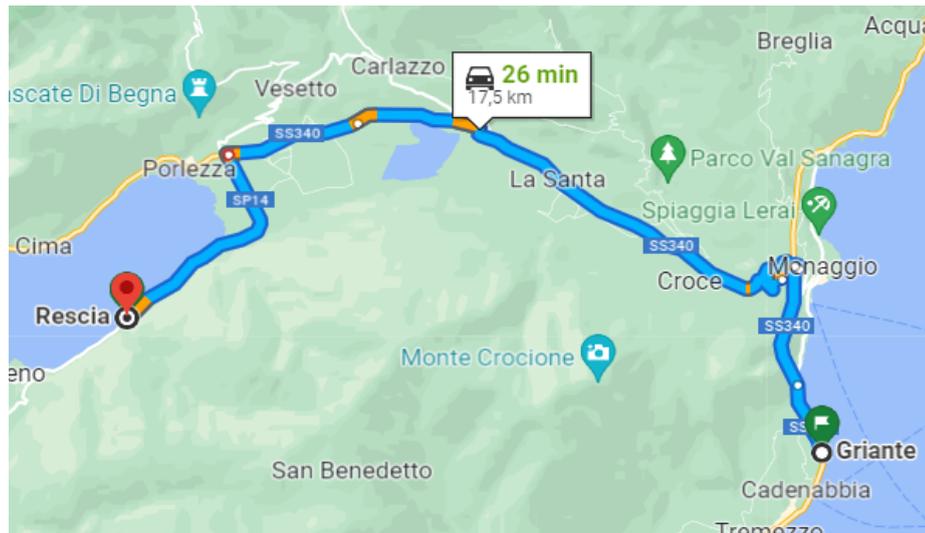


Figura 18 - Trasporto scenario C Nord

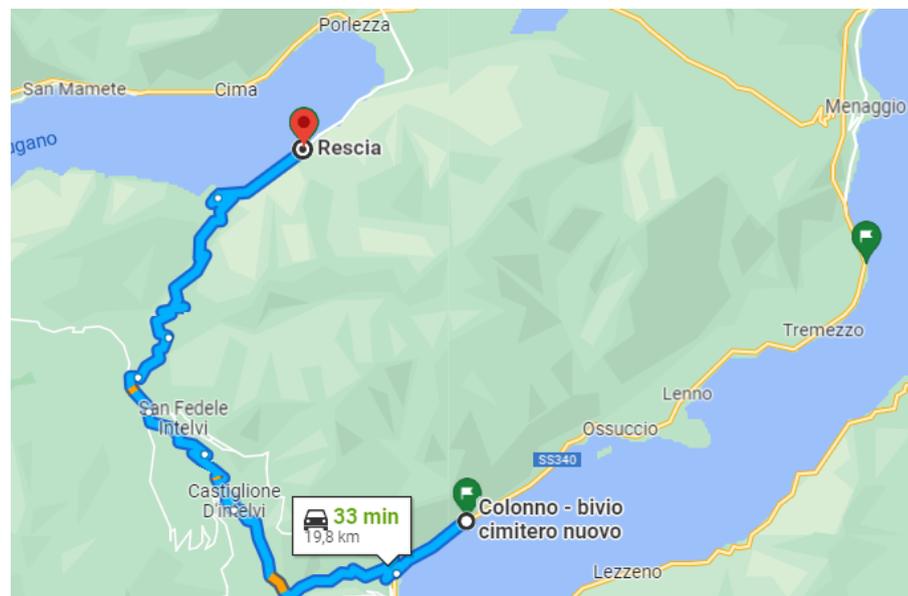


Figura 19 - Trasporto scenario C Sud

Per quanto riguarda invece il trattamento, sono stati utilizzati nella modellizzazione un frantoio per ridurre la pezzatura media dei materiali, un vaglio a secco per la prima separazione granulometrica e un vaglio ad umido per effettuare un lavaggio degli inerti e una successiva separazione granulometrica.

Lo **scenario D** prevede il trasporto dei materiali scavati dai due svincoli al sito di ripristino ambientale; quest'ultimo ubicato in Via per Guanzate 40, Bulgarograsso.

In questo caso i trasporti, da Nord e da Sud, avvengono via gomma e quindi sono stati modellizzati quattro escavatori, due per il carico e due per lo scarico dei materiali, due camion bilico per il trasporto e due camion tre assi per la movimentazione interna al cantiere precarico. I due spostamenti sono riportati nelle figure sottostanti e sono lunghi rispettivamente 46 km e 35 km.

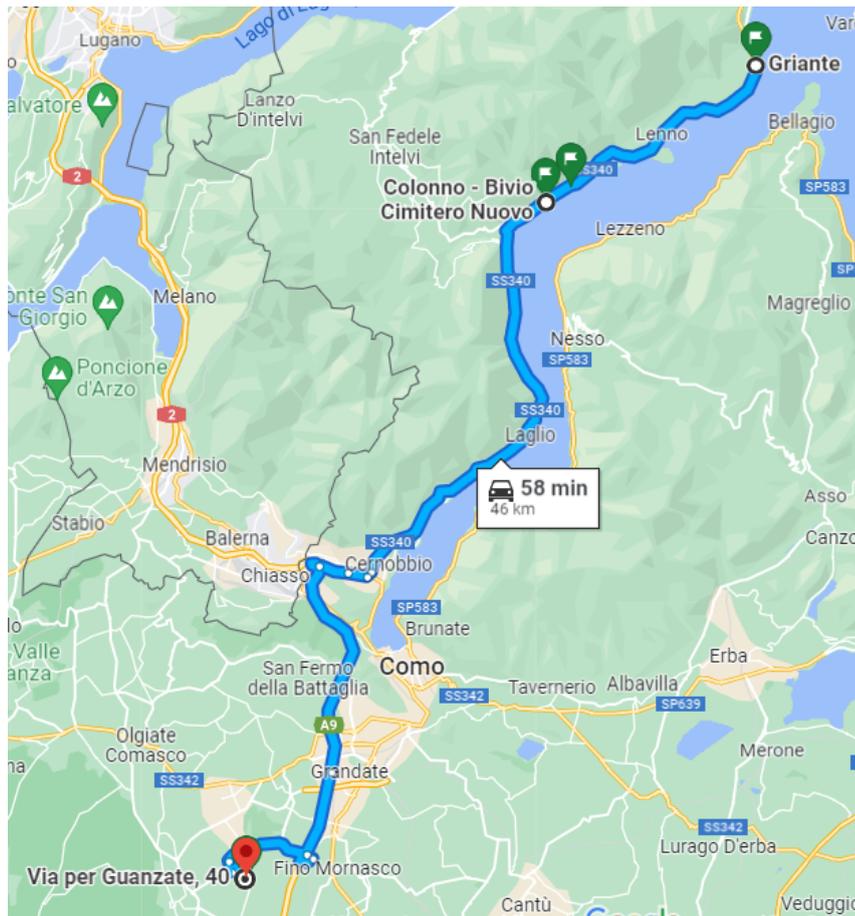


Figura 20 - Trasporto scenario D Nord

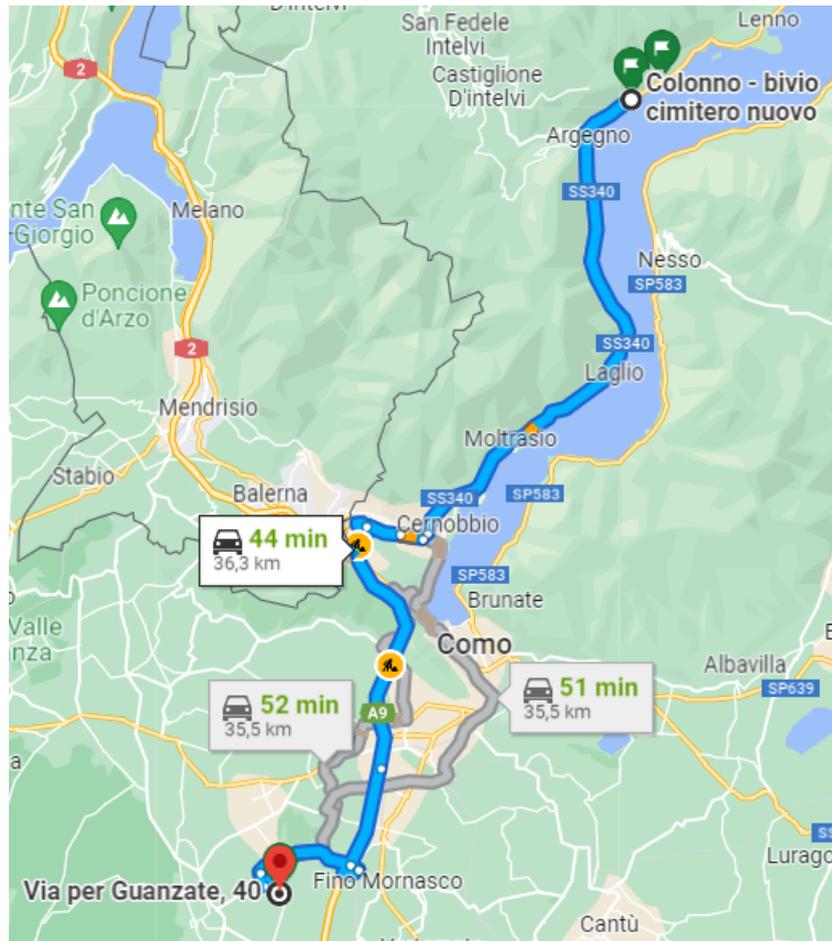


Figura 21 - Trasporto scenario D Sud

Per quanto riguarda invece il trattamento vero e proprio, è stato valutato l'utilizzo di un escavatore, di una pala gommata per lo spostamento dei materiali ed un rullo compattatore per abbancarli.

6 Risultati

6.1 Life Cycle Assessment comparativa di scenari alternativi di gestione di terre e rocce da scavo

Nel seguente capitolo vengono presentati i risultati relativi all'analisi LCA di confronto per i diversi scenari di gestione delle terre e rocce da scavo. In particolare, verrà presentato un primo confronto relativo ai soli scenari di fine vita seguito da un secondo confronto che include anche i trasporti verso i siti di destino (trasporto + fine vita).

6.1.1 Definizione dell'obiettivo e campo d'applicazione

L'obiettivo di questa analisi comparativa LCA è duplice. Innanzitutto, si vogliono valutare tre diverse opzioni per la gestione/ trattamento finale di terre e rocce da scavo provenienti dalla galleria definita "*Variante Tremezzina*".

Le tre differenti opzioni per il fine vita dei materiali scavati individuate sono:

- 1) conferimento in discarica per rifiuti inerti;
- 2) preparazione per il riutilizzo (trattamento in impianto per materiali inerti);
- 3) riutilizzo come sottoprodotto per ripristino ambientale.

In un secondo confronto verranno analizzati quattro scenari comprendenti la fase di trasporto dai siti di estrazione, ovvero lo svincolo Nord di Griante e lo svincolo Sud di Colonno, fino ai siti di destino, la movimentazione interna dei materiali unitamente alla gestione vera e propria già citata. Questi ultimi si possono riassumere nei seguenti scenari:

-
- A. conferimento via gomma da Nord e Sud dei materiali presso il sito di discarica per rifiuti inerti;
 - B. conferimento via lago da Nord e via gomma da Sud dei materiali al sito di discarica per rifiuti inerti;
 - C. conferimento via gomma da Nord e Sud dei materiali presso l'impianto autorizzato alla preparazione per il riutilizzo;
 - D. conferimento dei materiali via gomma da Nord e da Sud presso il sito in cui il materiale può essere riutilizzato come sottoprodotto ai fini del ripristino.

I risultati sono stati riportati nel dettaglio al capitolo 6.1.3 e sono stati discussi al capitolo 7.

I confini del sistema sono stati rappresentati tramite *flow chart* in Figura 22. Sono state omesse dai confini del sistema tutte fasi comuni ai tre scenari, ovvero:

- scavo della galleria;
- estrazione materiale scavato (dall'interno del tunnel allo svincolo);
- movimentazione interna dei materiali;
- trasporto dagli svincoli ai siti di destino;
- utilizzo del materiale post-trattamento in impianto;
- trattamento delle emissioni gassose di scarico;
- trattamento di polveri.

Inoltre, sono state escluse dal sistema in analisi le seguenti fasi specifiche relative ai diversi destini analizzati:

- gestione del sito destinato a ripristino, dopo l'intervento;
- utilizzo del materiale post-trattamento in impianto.

L'unità funzionale utilizzata per condurre le seguenti analisi è il volume complessivo di terre e rocce scavate quindi 394.212 m³ dal portale nord e 948.005 m³ dal portale sud per un totale di 1.342.217 m³.

I dati utilizzati nel seguente lavoro di tesi sono in parte primari ed in parte secondari. I dati primari derivano da relazioni tecniche e progetti esecutivi redatti da

Nexteco srl., altri sono stati stimati a partire dai dati a disposizione o sono stati ottenuti dalla banca dati *Ecoinvent*. Saranno tutti riportati nel paragrafo 6.1.2.

Sono state inoltre fatte le seguenti assunzioni:

- gli scenari di fine vita analizzati sono stati ipotizzati a partire dalle soluzioni individuate in fase progettuale;
- i siti di destino finale sono stati selezionati tra quelli individuati in fase progettuale tenendo conto dei volumi da gestire e della viabilità della zona oggetto di studio;
- i mezzi individuati per il trasporto sono stati ipotizzati, dal momento che non è noto il parco mezzi messo a disposizione. Per la movimentazione interna è stato scelto un camion tre assi dal momento che la possibilità di movimento interno al cantiere è limitata. Invece, per le lunghe percorrenze è stato scelto un camion bilico per la maggior volumetria di materiale trasportabile.

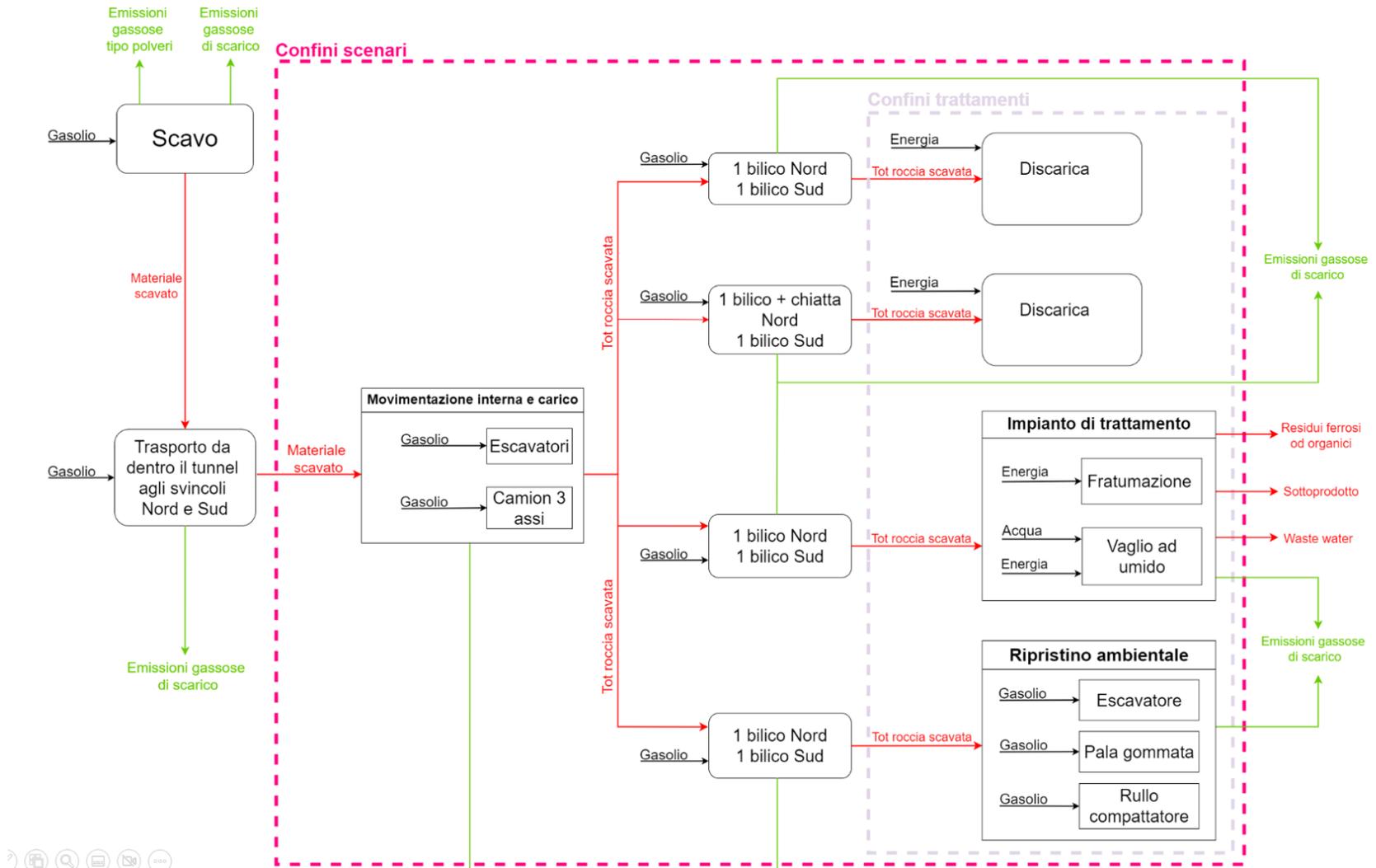


Figura 22 – Confini del sistema

6.1.2 Analisi dell'inventario

I dati primari presenti nel seguente elaborato sono stati raccolti durante il periodo di tirocinio svolto presso Nexteco s.r.l., tra marzo a maggio 2022. In particolare, essi riguardano le volumetrie del materiale da scavo, la tipologia e l'ubicazione geografica dei siti di destino, attraverso cui sono state stimate le distanze da percorrere.

Tutti gli altri dati utilizzati per l'analisi sono di tipo secondario, in particolare i consumi relativi ai mezzi di trasporto sono stati estrapolati dal *database Ecoinvent*, mentre la scelta delle componenti dell'impianto deriva dalla consultazione della letteratura (Borghi et al., 2017).

I processi *Ecoinvent* utilizzati per la modellizzazione degli scenari sono riportati in Tabella 6. Tutti i processi fanno riferimento ad un contesto europeo (RER ed *Europe without Switzerland*) ad eccezione del processo relativo ai consumi energetici che considera un mix italiano e al consumo di gasolio che è riferito ad un dato globale.

Tabella 6 – Processi del database Ecoinvent

INPUT	DATABASE
Camion bilico	<i>Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 APOS, S</i>
Camion 3 assi	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 APOS, S</i>
Chiatta + rimorchiatore	<i>Transport, freight, inland waterways, barge tanker {RER} processing APOS, S</i>
Escavatore	<i>Excavation, hydraulic digger {RER} processing APOS, S</i>
Rullo compattatore	<i>Excavation, skid-steer loader {RER} processing APOS, S</i>
Pala gommata	<i>Excavation, skid-steer loader {RER} processing APOS, S</i>
Discarica	<i>Inert waste {Europe without Switzerland} treatment of inert waste, sanitary landfill APOS, S</i>
Frantumazione e vagliatura/ consumo elettrico [kWh]	<i>Electricity, medium voltage {IT} market for APOS, S</i>
Frantumazione e vagliatura/ consumo gasolio [MJ]	<i>Diesel, burned in building machine {GLO} processing APOS, S</i>

Lavaggio-Acqua [kg]	<i>Tap water {Europe without Switzerland} tap water production, underground water with disinfection APOS, S</i>
---------------------	---

In Tabella 7 sono riportati i dati primari relativi ai volumi movimentati, distanze, densità e volumi, utilizzati per i calcoli di input in SimaPro.

Tabella 7 - Dati di input

Nome	Quantità	U.M.	Note
Densità	2,50	ton/m ³	
Volume conferito da Nord	394.212,00	m ³	
Volume conferito da Sud	948.005,00	m ³	
Volume totale	1.342.217,00	m ³	
Distanza Interna	0,50	km	Via gomma
Griante – Porlezza	17,50	km	Via gomma
Colonno – Porlezza	19,90	km	Via gomma
Griante – Discarica	51,80	km	Via gomma
Colonno – Discarica	42,10	km	Via gomma
Griante – Discarica	29,90	km	2,6 via lago e 27,3 via gomma
Griante – Bulgarograsso	46,00	km	Via gomma
Colonno – Bulgarograsso	35,00	km	Via gomma

Nelle tabelle sottostanti, Tabella 8 -Tabella 12, sono riportati i dati di input in SimaPro relativi ai singoli trattamenti finali e agli scenari.

Tabella 8 – Dati di input trattamenti finali

Nome	Quantità	U.M.	Note
<u>Smaltimento in discarica</u>			
Gestione inerti	3.355.542.500,00	kg	
<u>Riutilizzo come sottoprodotto</u>			
Pala gommata	1.342.217,00	m ³	
Rullo compattatore	1.342.217,00	m ³	
<u>Preparazione per il riutilizzo</u>			

Frantumazione e vagliatura/ consumo gasolio	29.910.047,52	MJ
Frantumazione e vagliatura/ consumo elettrico	3.791.763,03	kWh
Lavaggio-Acqua	40.266.510,00	kg
Lavaggio-Vaglio ad umido	78.519.694,50	MJ

Tabella 9 – Dati di input scenario A

Nome	Quantità	U.M.	Note
<u>Scenario A</u>			
Escavatore – N	788.424,00	m ³	Di questi un escavatore carica il camion allo svincolo e l'altro lo scarica al destino
Bilico – N	51.050.454,00	tkm	
Camion 3 assi – N	492.765,00	tkm	Camion per spostamento interno al cantiere
Discarica Gestione	3.355.542,50	kg	
Camion 3 assi – N	1.677.771,25	tkm	Camion per spostamento interno alla discarica
Escavatore – S	1.896.010,00	m ³	Di questi un escavatore carica il camion allo svincolo e l'altro lo scarica al destino
Bilico – S	99.777.526,25	tkm	
Camion 3 assi – S	1.185.006,25	tkm	Camion per spostamento interno al cantiere

Tabella 10 – Dati di input scenario B

Nome	Quantità	U.M.	Note
<u>Scenario B</u>			
Escavatore – N	1.576.848,00	m ³	Un escavatore carica sulla chiatta, uno la svuota e carica il camion e uno lo svuota in discarica
Bilico – N	26.904.969,00	tkm	
Camion 3 assi – N	492.765,00	tkm	Camion per spostamento interno al cantiere
Discarica Gestione	3.355.542,50	kg	
Camion 3 assi – N	1.677.771,25	tkm	Camion per spostamento interno alla discarica

Chiatta + Rimorchiatore	2.562.378,00	tkm	
Escavatore – S	1.896.010,00	m ³	Di questi un escavatore carica il camion allo svincolo e l'altro lo scarica al destino
Bilico – S	99.777.526,25	tkm	
Camion 3 assi – S	1.185.006,25	tkm	Camion per spostamento interno al cantiere

Tabella 11 – Dati di input scenario C

Nome	Quantità	U.M.	Note
<u>Scenario C</u>			
Escavatore – N	788.424,00	m ³	Di questi un escavatore carica il camion allo svincolo e l'altro lo scarica al destino
Bilico – N	45.334.380,00	tkm	
Camion 3 assi – N	492.765,00	tkm	Camion per spostamento interno al cantiere
Pala gommata	1.342.217,00	m ³	
Camion 3 assi – N	1.677.771,25	tkm	Camion per spostamento interno al sito di ripristino
Escavatore	1.342.217,00	m ³	
Rullo compattatore	1.342.217,00	m ³	
Escavatore – S	1.896.010,00	m ³	Di questi un escavatore carica il camion allo svincolo e l'altro lo scarica al destino
Bilico – S	82.950.437,50	tkm	
Camion 3 assi – S	1.185.006,25	tkm	Camion per spostamento interno al cantiere

Tabella 12 – Dati di input scenario D

Nome	Quantità	U.M.	Note
<u>Scenario D</u>			
Escavatore – N	788.424,00	m ³	Di questi un escavatore carica il camion allo svincolo e l'altro lo scarica al destino
Bilico – N	17.246.775,00	tkm	
Camion 3 assi – N	492.765,00	tkm	Camion per spostamento interno al cantiere

Frantumazione e vagliatura/ consumo gasolio	29.910.047,52	MJ	
Camion 3 assi – N	1.677.771,25	tkm	Camion per spostamento interno al sito di ripristino
Frantumazione e vagliatura/ consumo elettrico	3.791.763,03	kWh	
Lavaggio-Acqua	40.266.510,00	kg	
Lavaggio-Vaglio ad umido	78.519.694,50	MJ	
Escavatore – S	1.896.010,00	m ³	Di questi un escavatore carica il camion allo svincolo e l'altro lo scarica al destino
Bilico – S	47.163.248,75	tkm	
Camion 3 assi – S	1.185.006,25	tkm	Camion per spostamento interno al cantiere

6.1.3 Valutazione degli impatti

La valutazione è stata condotta utilizzando il metodo *ReCiPe 2016 Hierarchist a livello midpoint* che comprende 18 categorie di impatto, riportate in Tabella A - 1 nel capitolo Appendice, e prevede un orizzonte temporale di 100 anni. Infatti, il metodo ReCiPe include tre diverse prospettive per la valutazione degli impatti nel:

- Prospettiva individualista (I), che si basa su una prospettiva di 20 anni, secondo un approccio ottimistico;
- Prospettiva gerarchica (H), che si pone come situazione intermedia rispetto alle altre due prospettive e prevede un orizzonte temporale di cento anni;

Prospettiva egualitaria (E), che è la prospettiva più precauzionale e considera un orizzonte temporale di mille anni³⁴.

I risultati sono riportati tutti a livello di caratterizzazione e in percentuale in modo da poter visualizzare il confronto di tutte le categorie d'impatto, che altrimenti non sarebbe possibile dal momento che sono espresse in unità di misura differenti.

³⁴ <https://support.simapro.com/articles/Article/Perspectives-and-weighing-approach-in-ReCiPe-method>

Nell'Appendice, invece, **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono riportate le tabelle con i risultati in valori assoluti per ogni categoria d'impatto.

Nei paragrafi a seguire verranno presentati i risultati relativi a due analisi comparative. La prima si riferisce al confronto tra i soli tre destini per la gestione finale dei materiali da scavo. La seconda analisi prevede il confronto dei quattro scenari che includono anche i trasporti dagli svincoli, Nord e Sud, della galleria fino ai siti di destino e la movimentazione e carico dei materiali.

6.1.3.1 Confronto fra scenari di fine vita dei materiali da scavo

Questa prima analisi prevede il confronto dei tre destini che comprendono smaltimento in discarica, preparazione per il riutilizzo e riutilizzo come sottoprodotto. Osservando il grafico in Figura 23 si può notare come lo smaltimento in discarica rappresenti l'opzione di fine vita che comporta la minore sostenibilità ambientale per tutte le categorie d'impatto; rappresentando il peggior scenario tra quelli confrontati. Per quanto riguarda le altre due opzioni si può affermare che il riutilizzo come sottoprodotto rappresenti la scelta meno impattante, seguita dalla preparazione per il riutilizzo.

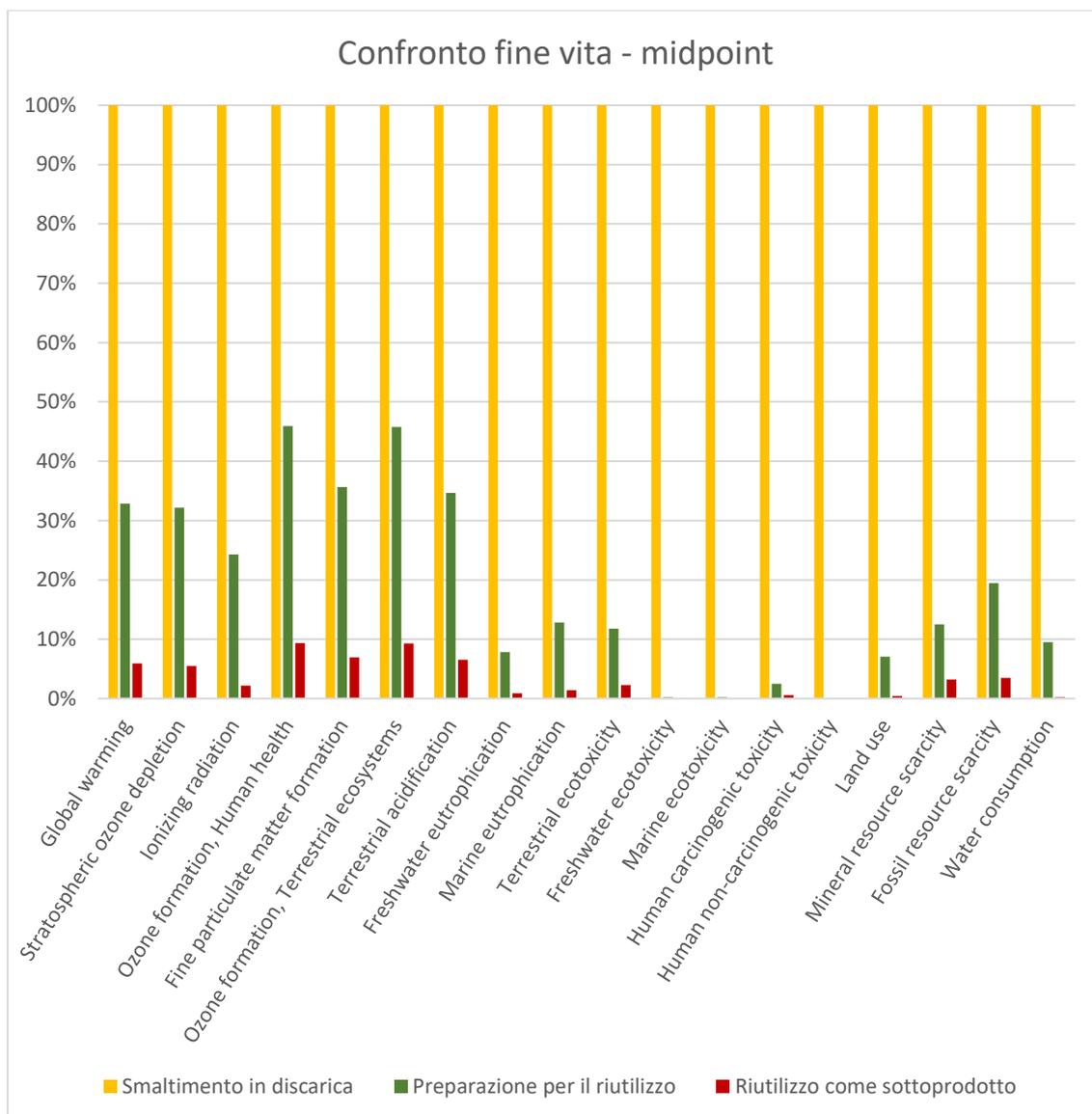


Figura 23 – Caratterizzazione a livello midpoint del confronto tra i possibili fine vita per le terre e rocce da scavo

Al fine di investigare i contributi più significativi che determinano l'impatto ambientale per gli scenari di fine vita si riportando nei grafici in Figura 24 e in Figura 25 i contributi relativi agli elementi che compongono rispettivamente la preparazione per il riutilizzo e il riutilizzo come sottoprodotto. Tale valutazione non è stata svolta per lo smaltimento in discarica in quanto tale opzione è stata modellizzata utilizzando un processo *Ecoinvent* unitario.

In Figura 24 sono riportati i risultati relativi allo scenario che prevede la preparazione delle terre e rocce da scavo per il riutilizzo. Tale scenario prevede l'inclusione di tre principali elementi ovvero: frantumazione, vagliatura a secco seguita

da lavaggio e vagliatura a umido finale. Osservando tali risultati si può affermare che l'elemento più impattante risulta essere il vaglio a umido i cui consumi determinano un impatto maggiore per 10 delle 18 categorie d'impatto superando anche il 60% dell'impatto complessivo. Il processo di frantumazione e vagliatura a secco si attesta più rilevante per 7 categorie d'impatto e in particolare per il *land use*, contribuisce per oltre l'80% dell'impatto complessivo. Da tali risultati emerge inoltre che per 17 categorie d'impatto, l'apporto di acqua utilizzata nella fase di lavaggio e vagliatura a umido apporti un impatto inferiore al 2%. Al contrario, l'impatto generato dall'utilizzo di acqua per il lavaggio dei materiali risulta particolarmente rilevante per la categoria *water consumption* con un impatto vicino al 50%.



Figura 24 – Caratterizzazione a livello midpoint dei contributi degli elementi che compongono la preparazione per il riutilizzo delle terre e rocce da scavo

I risultati relativi al riutilizzo delle terre e rocce da scavo come sottoprodotto sono riportati nel grafico in Figura 25. Tali risultati evidenziano che l'impatto generato dal

riutilizzo come sottoprodotto è ripartito equamente, per tutte le categorie d'impatto, tra le tre tipologie di mezzi d'opera individuati, ovvero escavatore, pala gommata e rullo compattatore. La pala gommata e il rullo compattatore sono stati modellizzati tramite lo stesso processo LCA *Ecoinvent* in quanto i loro consumi risultano paragonabili; dunque, l'impatto generato dal loro funzionamento risulta lo stesso. L'escavatore, invece, ha un impatto leggermente superiore agli altri due mezzi d'opera, in particolare per le categorie *human carcinogenic toxicity*, *mineral resource scarcity* per le quali raggiunge quasi il 45% dell'impatto complessivo.

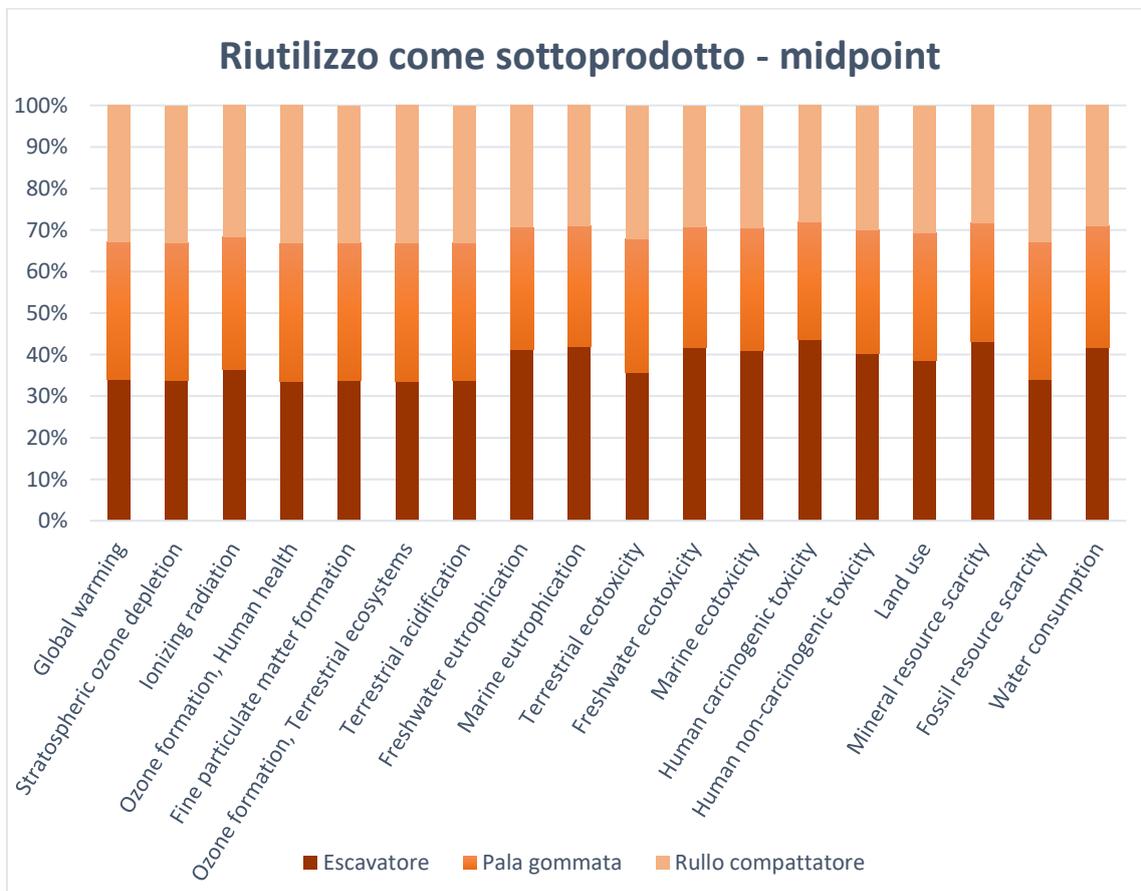


Figura 25 – Caratterizzazione a livello midpoint dei contributi degli elementi che compongono il riutilizzo come sottoprodotto delle terre e rocce da scavo

6.1.3.2 Confronto scenari A, B, C, D

In questa sezione si riportano i risultati relativi agli scenari di gestione delle terre e rocce da scavo che includono anche il trasporto verso i siti di destino. I quattro scenari, dettagliatamente descritti nel paragrafo 5.3.5.3, sono:

- A. smaltimento in discarica – trasporto via gomma;
- B. smaltimento in discarica – trasporto via gomma e via lago;
- C. preparazione per il riutilizzo – trasporto via gomma;
- D. riutilizzo come sottoprodotto – trasporto via gomma.

Ogni scenario sarà successivamente riportato singolarmente al fine di comprendere più chiaramente il contributo delle diverse componenti di cui è composto (movimentazione interna, trasporto, destino finale).

I risultati riportati nel grafico in Figura 26 dimostrano ancora una volta come lo scenario che prevede lo smaltimento in discarica risulti il più impattante e conferma, come già ampiamente noto da letteratura, come questo possa rappresentare in molti casi il *worst case*. Tra i due scenari di smaltimento in discarica del materiale da scavo, lo scenario B, che prevede parte del trasporto via lago presenta degli impatti minori rispetto allo scenario A. Tale risultato è imputato in parte alla riduzione del tragitto permesso dal passaggio via lago e in parte alla elevata capacità del mezzo di trasporto via lago (chiatta trainata da un rimorchiatore) che permette di diminuire il numero di viaggi. I due scenari comunque presentano una differenza percentuale inferiore al 3% per tutte le categorie d'impatto ad eccezione della categoria d'impatto *terrestrial ecotoxicity* per la quale lo scenario B presenta un impatto dell'11% inferiore a quello prodotto dallo scenario A.

Lo scenario D, che prevede il riutilizzo del materiale scavato, risulta lo scenario a minor impatto ambientale e si pone dunque come alternativa più sostenibile tra quelle individuate. Tuttavia, l'inclusione dei trasporti nella valutazione determina un'evidente riduzione nella distanza tra lo scenario C e D. Nel caso delle categorie d'impatto

terrestrial ecotoxicity e *mineral resource scarcity* lo scenario D presenta un impatto più elevato rispetto allo scenario C. Tale risultato è imputato alle distanze dei siti di destino e dunque ai diversi tragitti percorsi nei diversi scenari.

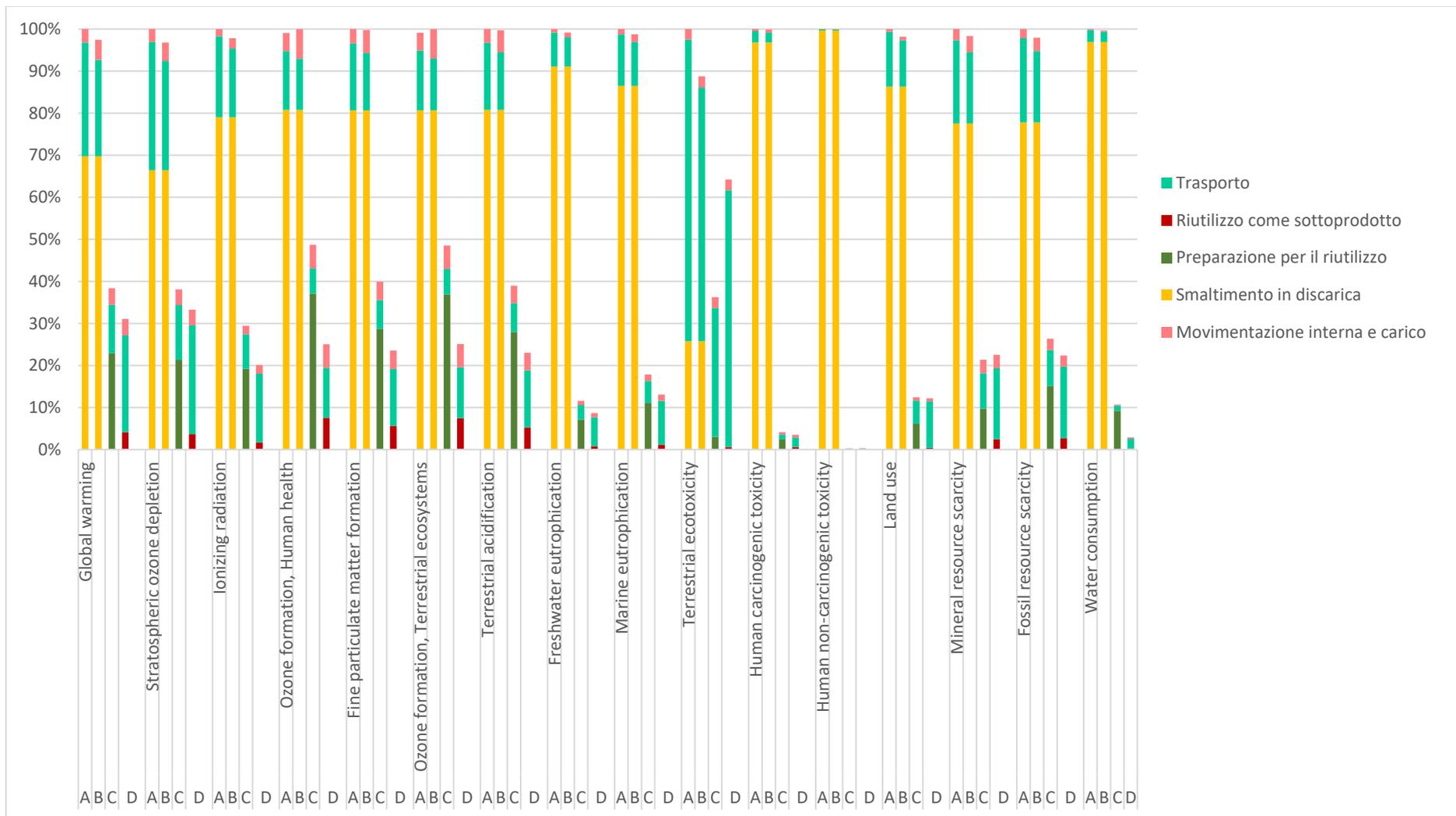


Figura 26 – Caratterizzazione a livello midpoint dei risultati relativi al confronto tra i quattro scenari: A) smaltimento in discarica – trasporto via gomma, B) smaltimento in discarica – trasporto via lago e via gomma, C) preparazione per il riutilizzo – trasporto via gomma, D) riutilizzo come sottoprodotto – trasporto via gomma

Di seguito in Figura 27, Figura 28, Figura 29 e Figura 30 vengono riportati i risultati per ogni singolo scenario al fine di ottenere una comprensione più immediata del contributo agli impatti dato dalle singole componenti.

I risultati relativi allo scenario A sono riportati nel grafico in Figura 27 dal quale si può evincere come per 17 categorie d'impatto, lo smaltimento in discarica sia responsabile della maggior parte dell'impatto mediamente dell'85%, ad eccezione della categoria d'impatto *terrestrial ecotoxicity*, in cui il trasporto determina un impatto superiore al 70% a causa del lungo percorso effettuato tramite l'utilizzo di un camion bilico. In generale il trasporto si attesta come seconda componente più impattante con un'incidenza di oltre il 25% sull'impatto totale per le categorie *stratospheric ozone depletion* e *global warming*. La movimentazione interna, che prevede un trasporto interno al cantiere tramite camion tre assi e il funzionamento di escavatori, prevede un impatto irrisorio che non supera mai il 4% rispetto all'impatto complessivo.

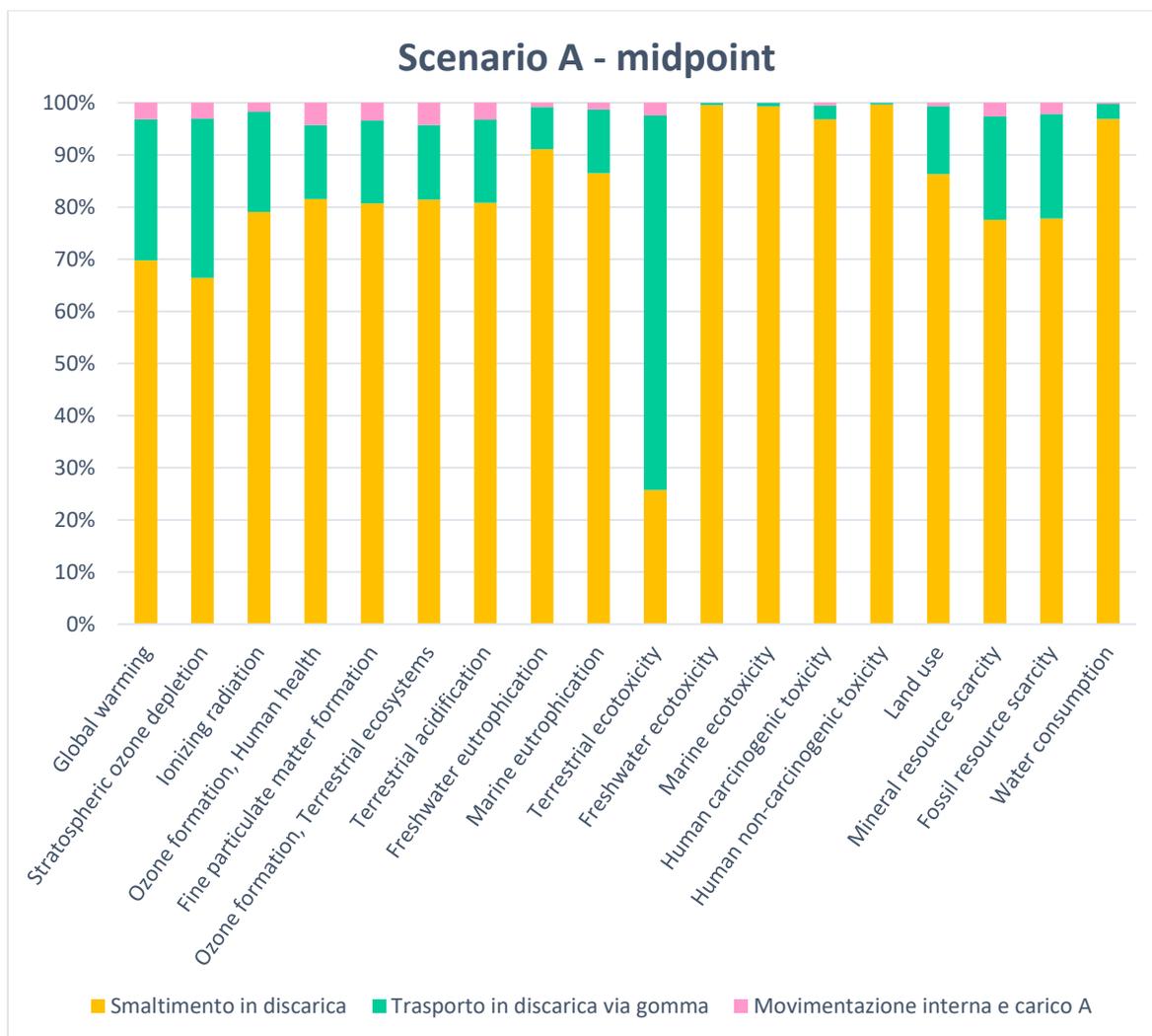


Figura 27 – Caratterizzazione a livello midpoint dello scenario A: smaltimento in discarica – trasporto via gomma

In Figura 28 è riportato l'istogramma rappresentativo dello scenario B. Come già discusso, la differenza tra il seguente e lo scenario A sta nel trasporto che, in questo caso, da Nord avviene tramite l'utilizzo di una chiatta con rimorchiatore per il primo tratto, per poi proseguire via gomma per un tratto più breve rispetto a quello previsto nello scenario A. Osservando i risultati si può affermare che, anche in questo caso la fase di smaltimento sia quella più impattante, seguita dal trasporto e dalla movimentazione interna. In questo scenario però il contributo relativo ai trasporti ha un peso minore; tuttavia, ha il peso maggiore per la categoria *terrestrial ecotoxicity* a causa del lungo percorso effettuato tramite l'utilizzo combinato di un camion bilico e chiatta.

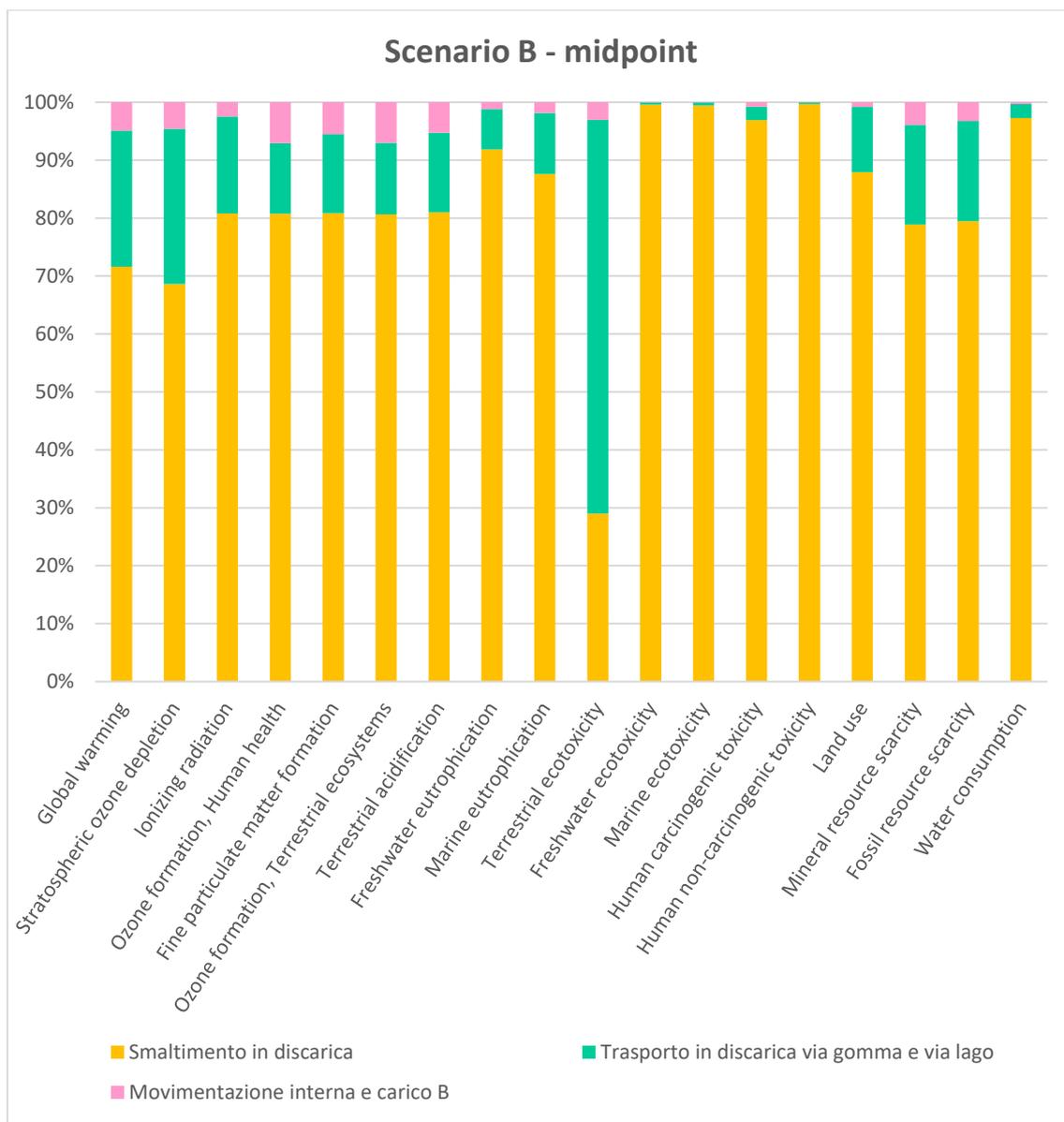


Figura 28 – Caratterizzazione a livello midpoint dello scenario B: smaltimento in discarica – trasporto via lago e via gomma

Osservando la Figura 29, che rappresenta lo scenario C si può notare come la fase di trattamento in impianto sia la fase più impattante per 15 delle 18 categorie d’impatto, seguita poi dal trasporto, che anche in questo caso presenta un impatto molto elevato (85%) per la categoria *terrestrial ecotoxicity*. La movimentazione interna e carico ha un impatto sempre minore del 15% rispetto all’impatto complessivo.

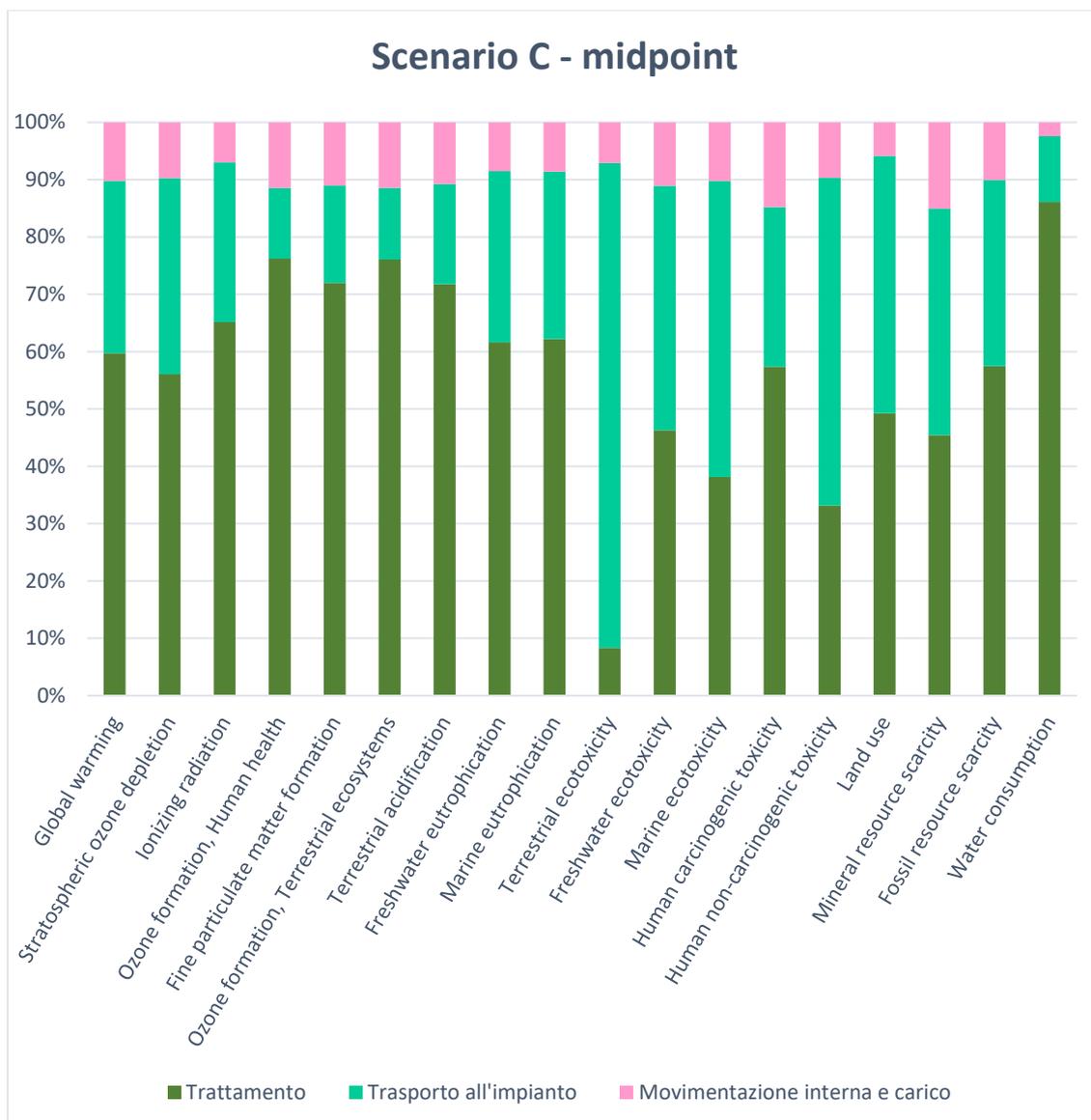


Figura 29 – Caratterizzazione a livello midpoint dello scenario C: preparazione per il riutilizzo

Infine, in Figura 30 sono presentati i risultati relativi allo scenario D. Come si può osservare dal grafico, a differenza degli scenari A, B e C, la componente che determina per tutte le categorie gli impatti maggiori è quella relativa al trasporto. La componente relativa al ripristino ambientale ha un'incidenza che si attesta al di sotto del 30%, mentre la componente relativa alla movimentazione interna e carico ha un impatto minore che supera il 20% dell'impatto complessivo solo per le due categorie relative alla formazione di ozono (*ozone formation HH, terrestrial ecosystem*).

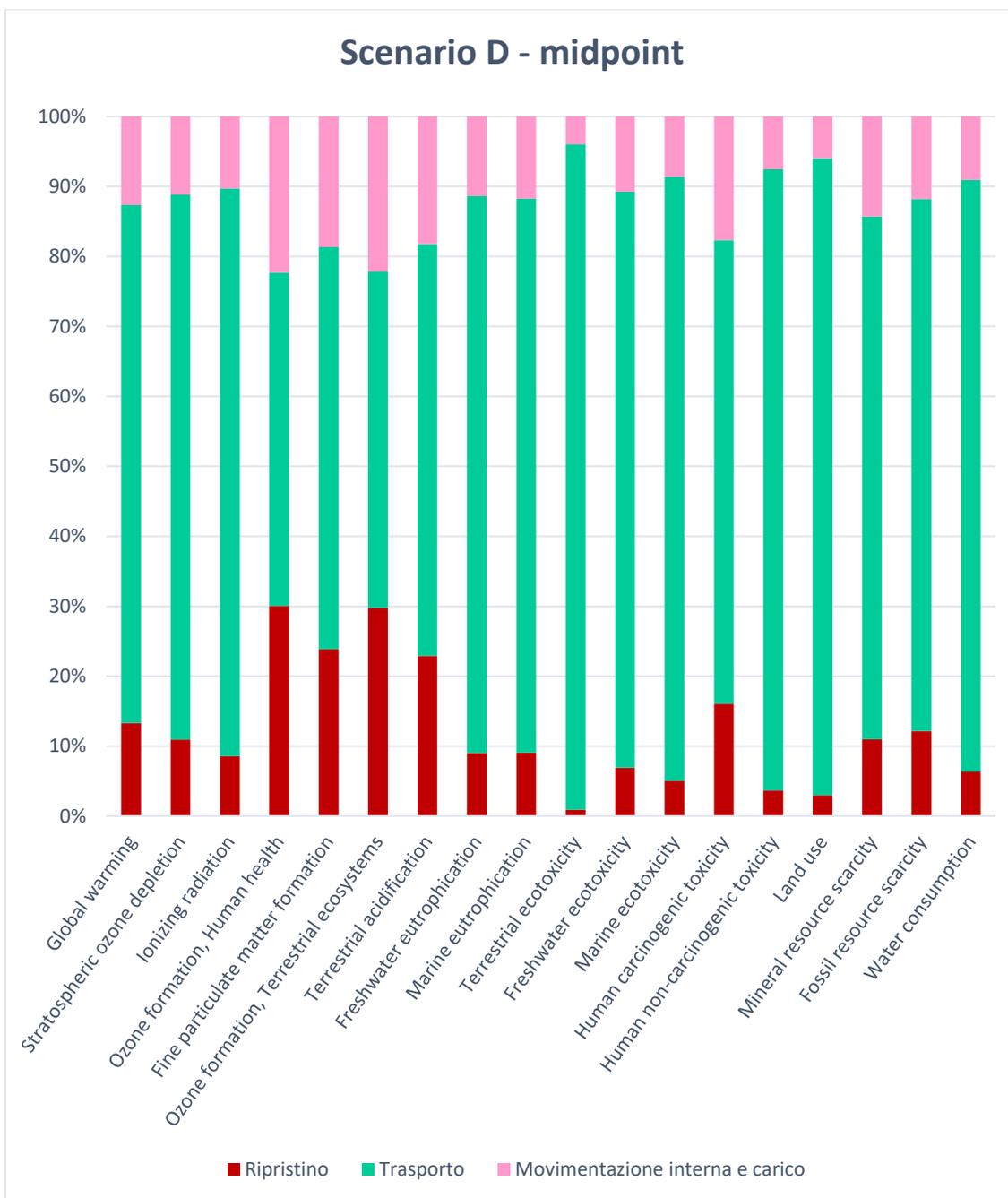


Figura 30 – Caratterizzazione a livello midpoint dello scenario D: riutilizzo come sottoprodotto – trasporto via gomma

7 Discussione

A valle dello studio condotto è possibile effettuare alcune considerazioni relative agli impatti ambientali registrati per le singole fasi di trasporto e gestione e per gli scenari complessivi esaminati. Per quanto riguarda lo scenario di smaltimento in discarica, esso rappresenta sicuramente la scelta peggiore dal momento che presenta gli impatti più rilevanti per tutti gli indicatori *midpoint*, dovuti soprattutto alla fase di gestione in discarica ossia al “fine vita” dei materiali da scavo. È interessante notare il dettaglio dei risultati ottenuti tra lo scenario A e B che differiscono soltanto rispetto alle modalità di trasporto. Risulta più sostenibile lo scenario che prevede un tratto di trasporto via lago, ma solo per una percentuale di riduzione degli impatti pari al 3% complessivo, pertanto, tale miglioria nei trasporti non rappresenta un vantaggio così impattante da poter essere considerato un’opzione sempre preferibile.

Al versante opposto, il ripristino ambientale è lo scenario che presenta gli impatti ambientali più bassi classificandosi come il più sostenibile. Anche in questo caso, la maggiore sostenibilità di questo scenario non è da intendersi come sempre verificabile in quanto va valutata caso per caso la fase di trasporto al sito di destino che contribuisce per la percentuale maggiore agli impatti complessivi.

Lo scenario di preparazione al riutilizzo ha un impatto intermedio rispetto agli altri due e per molti indicatori comporta impatti inferiori mediamente del 50% rispetto agli scenari di discarica (A e B). In relazione a questo scenario, si ricorda che le operazioni unitarie modellizzate sono relative a frantumazione, vagliatura a secco seguita da lavaggio e vagliatura a umido finale. Ogni altra configurazione impiantistica, per esempio riguardante materiali che necessitino di particolari trattamenti chimico-fisici anche blandi, andrebbero riconsiderati in una modellizzazione *ad hoc* per verificarne gli impatti specifici.

In generale, si osserva che le fasi che recano il maggiore contributo in termini di impatti ambientali, sono quelle relative alla gestione dei materiali in discarica nel caso dei primi due scenari indagati (smaltimento in discarica), ai trattamenti di preparazione

al riutilizzo (nello scenario C) e ai trasporti nel caso dello scenario relativo al ripristino ambientale.

Dal confronto generale di tutti gli scenari, si può osservare che la gestione finale in discarica apporti gli impatti più rilevanti con percentuali di contributo che arrivano oltre al 99% dimostrandosi l'opzione largamente meno sostenibile. Tale evidenza è in accordo con quanto indicato dalla strategia di gestione dei materiali suggerita dalla UE ³⁵ nell'ambito della cosiddetta "gerarchia dei rifiuti" che intende lo smaltimento in discarica come *extrema ratio* da prendere in considerazione solo se le opzioni di prevenzione, preparazione per il riutilizzo, riciclaggio, altro recupero (per esempio recupero di energia) non sono in alcun modo perseguibili.

³⁵ Direttiva 2008/98/CE

8 Conclusioni

Lo studio condotto nell'ambito della tesi ha riguardato una valutazione di sostenibilità ambientale inerente al progetto di scavo della galleria definita "Variante Tremezzina" sul lago di Como; un progetto che si snoda per circa 10 km con l'obiettivo di rappresentare un'alternativa per il traffico alla S.S 340 "Regina", attuale unico collegamento da nord a sud sulla sponda occidentale del lago.

L'obiettivo dello studio è stato quello di conseguire una valutazione LCA, sia relativa ai diversi destini individuati per i materiali scavati, che una valutazione LCA che comprendesse, oltre ai destini, la fase di trasporto sino al punto d'arrivo e la movimentazione interna al cantiere omettendo dai confini del sistema le fasi di lavoro comuni a tutti i possibili scenari di gestione esaminati.

Nel rispetto delle opzioni indicate dalla gerarchia dei rifiuti, sono state confrontate tre alternative che prevedessero:

- uno scenario di **smaltimento** in discarica (ex. D.Lgs. 152/06 art. 183 – codice EWC/CER 170504)
- uno scenario di **preparazione per il riutilizzo** (ex d.lgs. 152/06 art. 184ter) e
- uno scenario relativo al riutilizzo (ascrivibile a una strategia di **prevenzione** in quanto i materiali vengono recuperati come sottoprodotti ex d.lgs. 152/06 art. 184bis).

In particolare, sono stati individuati tre siti di destino: discarica per rifiuti inerti, impianto di trattamento e ripristino ambientale ai fini della rimodellazione di un sito di cava, mentre gli scenari esaminati sono stati quattro, poiché si è voluta indagare una differenza tra due opzioni di trasporto in discarica prevedendo in uno dei due casi un tratto di percorso via lago che prevedesse l'uso di una chiatta trainata da rimorchiatore.

La prima analisi svolta ha visto il confronto tra le tre alternative di gestione delle terre e rocce da scavo e ha permesso di stabilire un ranking di sostenibilità tra le alternative di fine vita. In particolare, è emerso che la soluzione più sostenibile è quella

del riutilizzo come sottoprodotto, seguita dalla preparazione per il riutilizzo, infine lo smaltimento in discarica si attesta come alternativa più impattante sull'ambiente.

Nella seconda analisi presentata sono stati ipotizzati quattro scenari includendo i trasporti verso i siti di destino e la movimentazione interna dei materiali. Questo ulteriore livello di analisi è stato effettuato per dimostrare come l'LCA possa essere un importante strumento da utilizzare anche in fase progettuale poiché permette in una fase di valutazione preliminare di confrontare diverse opzioni di destino.

In conclusione, nel presente lavoro di tesi è stato possibile osservare come la metodologia LCA sia versatile, in quanto applicabile anche a processi complessi, come quelli relativi alle grandi opere di pubblica utilità.

L'LCA si conferma un importante strumento di valutazione di sostenibilità che consente analisi oggettive, robuste e informative, in grado di orientare progettisti ed enti di controllo supportando le relative valutazioni con dati quantitativi di impatto ambientale, particolarmente significativi per ottenere un processo di progettazione, prima, e decisionale, poi, basati su dati scientifici oggettivi.

I risultati ottenuti suffragano ulteriormente le indicazioni della Direttiva Europea sui rifiuti, testimoniando la minore performance di sostenibilità relativa agli scenari di smaltimento in discarica rispetto ad alternative di preparazione per il riutilizzo e di prevenzione che hanno dimostrato livelli crescenti di sostenibilità.

9 Bibliografia

- Abejón, R., Laso, J., Margallo, M., Aldaco, R., Blanca-Alcubilla, G., Bala, A., Fullana-i-Palmer, P., 2020. Environmental impact assessment of the implementation of a Deposit-Refund System for packaging waste in Spain: A solution or an additional problem? *Sci. Total Environ.* 721. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137744>
- Baldo, G.L., 2005. *Analisi del ciclo di vita*; ed. Ambiente.
- Battle-Bayer, L., Bala, A., Lemaire, E., Albertí, J., García-Herrero, I., Aldaco, R., Fullana-i-Palmer, P., 2019. An energy- and nutrient-corrected functional unit to compare LCAs of diets. *Sci. Total Environ.* 671, 175–179. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.332>
- Borghi, G., Pantini, S., Rigamonti, L., 2017. Analisi LCA a supporto della pianificazione della gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione non pericolosi in Lombardia. *Ing. dell'Ambiente* 4, 313–329.
- Bresso, M., Russo, R., Zeppetella, A., 1985. *Analisi dei progetti e valutazione d'impatto ambientale*. Franco Angeli, Milano.
- Brundtland, G.H., 1987. *Our Common Future ('The Brundtland Report')*: World Commission on Environment and Development. *Top 50 Sustain. Books* 52–55. https://doi.org/10.9774/gleaf.978-1-907643-44-6_12
- Cassin, M., Foscari, C., 2006. *L'ambiente nella programmazione comunitaria*.
- Cavenago, G., Rigamonti, L., Grosso, M., 2021. Le fasi opzionali di normalizzazione e pesatura nell'analisi del ciclo di vita: approcci possibili e stato dell'arte. *Ing. dell'Ambiente* 8, 188–201.
- Chiesa, V., 2011. *La sostenibilità*.
- Circular Economy Network, 2021. *3° rapporto sull'economia circolare in Italia*.
- Corominas, L., Byrne, D.M., Guest, J.S., Hospido, A., Roux, P., Shaw, A., Short, M.D., 2020. The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: A best practice guide and critical review. *Water Res.* 184. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116058>
- Curran, M.A., 2017. *Overview of Goal and Scope Definition in Life Cycle Assessment*.
- Dalla Valle, A., Lavagna, M., Campioli, A., 2016. *Strumenti LCA di supporto al settore delle costruzioni*. Politec. di Milano, Dip. ABC.
- DPR 120, D., 2017. *Regolamento recante la disciplina semplificata della gestione delle*

terre e rocce da scavo, ai sensi dell'articolo 8 del decreto legge 12 settembre 2014, n. 133, convertito, con modificazioni dalle legge 11 novembre 2014, n. 164.

Ecoinvent, 2007. Overview and Methodology. <https://doi.org/10.2307/j.ctv287sgj6.9>

Eurostat, 2021. Waste statistics [WWW Document]. Online.

Fava, J., Smerek, A., Heinrich, A., Morrison, L., 2014. The role of the society of environmental toxicology and chemistry (SETAC) in life cycle assessment (LCA) development and application.

Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R.B.H., Christiansen, K., & Klüppel, H., 2006. Commentaries The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044 11 (2), 80–85.

Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., Suh, S., 2009. Recent developments in Life Cycle Assessment. *J. Environ. Manage.* 91, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>

Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hischer, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M., Wernet, G., 2007. Overview and Methodology. *ecoinvent Cent.* 1–77.

Goedkoop, M., Al, E., 2016. Introduction to LCA with SimaPro Colophon.

Guest, J.S., Skerlos, S.J., Barnard, J.L., Beck, M.B., Daigger, G.T., Hilger, H., Jackson, S.J., Karvazy, K., Kelly, L., Macpherson, L., Mihelcic, J.R., Pramanik, A., Raskin, L., Van Loosdrecht, M.C.M., Yeh, D., Love, N.G., 2009. A new planning and design paradigm to achieve sustainable resource recovery from wastewater. *Environ. Sci. Technol.* 43, 6126–6130. <https://doi.org/10.1021/es9010515>

Hoehn, D., Laso, J., Cristóbal, J., Ruiz-Salmón, I., Butnar, I., Borrion, A., Bala, A., Fullana-i-Palmer, P., Vázquez-Rowe, I., Aldaco, R., Margallo, M., n.d. Regionalized Strategies for Food Loss and Waste Management in Spain under a Life Cycle Thinking Approach.

Huybrechts, D., Berloznik, R., Wouters, G., Marion, J., Valenduc, G., Vendramin, P., 1996. The role of ecobalances in environmental 4.

ISO, 2017. INTERNATIONAL STANDARD (ISO) 18504 Soil quality — Sustainable remediation ISO 2017.

Jensen, A.A., Hoffman, L., Moller, B.T., Schmidt, A., 1997. No Title. EEA, Eur. Environ. Agency.

Jiménez-González, C., Kim, S., Overcash, M.R., 2000. Methodology for developing gate-to-gate Life cycle inventory information. *Int. J. Life Cycle Assess.* 5, 153–159. <https://doi.org/10.1007/BF02978615>

-
- KlÃ, W., Grahl, B., 2014. Life cycle assessment (LCA): a guide to best practice. John Wiley & Sons.
- Laurenti, R., Bonoli, A., 2008. LA GESTIONE DEI RIFIUTI INERTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE: RACCOLTA, TRATTAMENTO, UTILIZZO.
- Lundie, S., Peters, G.M., Beavis, P.C., 2004. Life cycle assessment for sustainable metropolitan water systems planning. *Environ. Sci. Technol.* 38, 3465–3473. <https://doi.org/10.1021/es034206m>
- Nexteco, 2022. Mi 193/19 Progettazione esecutiva ed esecuzione dei lavori dell'intervento: "S.S. 340 'REGINA' – VARIANTE ALLA TREMEZZINA."
- Puglisi, S., 2006. Manuale Tecnico di Ingegneria naturalistica. Tipografia Zanini-Bologna.
- Roca i Puigvert, M., Ayuso, S., Bala, A., Fullana-i-Palmer, P., 2020. What factors determine attitudes towards the implementation of a packaging deposit and refund system? A qualitative study of the perception of Spanish consumers. *J. Environ. Manage.* 270. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110891>
- Sazdovski, I., Bala, A., Fullana-i-Palmer, P., 2021. Linking LCA literature with circular economy value creation: A review on beverage packaging. *Sci. Total Environ.* 771, 145322. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145322>
- SuRF Italy, 2014. Sostenibilit  nelle Bonifiche in Italia 28.
- UE Commission, 2022. COMUNICAZIONE DELLA COMMISSIONE AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSIGLIO EUROPEO, AL CONSIGLIO, AL COMITATO ECONOMICO E SOCIALE EUROPEO E AL COMITATO DELLE REGIONI Verso un'economia verde, digitale e resiliente: il modello di crescita europeo. Bruxelles.
- UNI EN ISO 14040, 2006.
- UNI EN ISO 14044, n.d.

10 Appendice

Tabella A - 1: Categorie di impatto e rispettivi indicatori

Categoria di impatto	Unità	Indicatore di impatto
Global warming	kg CO2 eq	GWP100: Potenziale di surriscaldamento globale totale nell'orizzonte temporale di 100 anni.
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	Potenziale di danneggiamento dello strato di ozono stratosferico nell'orizzonte temporale di cento anni
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	Quantificazione dell'impatto delle radiazioni ionizzanti sulla popolazione
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	Incidenza sulla malattia umana dovuta alla formazione di ozono
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	Incidenza sulla malattia dovuta all'emissione di PM 2.5
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	Incidenza sull'ecosistema terrestre dovuta alla formazione di ozono
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	Valutazione dell'impatto delle sostanze acidificanti negli ecosistemi terrestri e delle acque dolci
Freshwater eutrophication	kg P eq	Livello di contaminazione delle acque dolci da parte dei nutrienti espressi in fosforo equivalente
Marine eutrophication	kg N eq	Livello di contaminazione delle acque marine da parte dei nutrienti espressi in azoto equivalente
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	Comparative Toxic Unit for ecosystems
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	Comparative Toxic Unit for ecosystems
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	Comparative Toxic Unit for ecosystems
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	Comparative Toxic Unit for human: aumento della morbilità cancerogena nella popolazione totale per unità di un chimico emesso
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	Comparative Toxic Unit for human: aumento della morbilità non cancerogena nella popolazione totale per unità di un chimico emesso

Land use	m ² a crop eq	Metri quadri utilizzati direttamente ed indirettamente
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	Impoverimento delle risorse abiotiche minerali e metalliche
Fossil resource scarcity	kg oil eq	Impoverimento delle risorse abiotiche in termini di combustibili fossili
Water consumption	m ³	Impoverimento della risorsa idrica

Tabella A - 2: Risultati LCA caratterizzati a livello midpoint relativi al confronto tra i destini di fine vita

Impact category	Unit	Smaltimento in discarica	Ripristino	Trattamento in impianto
Global warming	kg CO ₂ eq	3,54E+07	2,10E+06	1,16E+07
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	2,25E+01	1,23E+00	7,24E+00
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	1,30E+06	2,83E+04	3,16E+05
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	2,70E+05	2,52E+04	1,24E+05
Fine particulate matter formation	kg PM _{2.5} eq	8,39E+04	5,84E+03	2,99E+04
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _x eq	2,76E+05	2,56E+04	1,26E+05
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	1,76E+05	1,15E+04	6,11E+04
Freshwater eutrophication	kg P eq	1,08E+04	9,22E+01	8,43E+02
Marine eutrophication	kg N eq	6,26E+02	8,59E+00	8,03E+01
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1,20E+08	2,71E+06	1,41E+07
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	5,73E+07	1,78E+04	1,15E+05
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	8,02E+07	2,48E+04	1,58E+05
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	8,97E+06	5,18E+04	2,21E+05
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	2,92E+09	3,21E+05	2,27E+06
Land use	m ² a crop eq	1,19E+07	5,02E+04	8,42E+05
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	1,43E+05	4,57E+03	1,79E+04
Fossil resource scarcity	kg oil eq	1,88E+07	6,58E+05	3,66E+06
Water consumption	m ³	8,80E+05	1,67E+03	8,37E+04

Tabella A - 3: Risultati LCA caratterizzati a livello midpoint per lo scenario - A smaltimento in discarica – trasporto via gomma

Impact category	Unit	Total	Smaltimento in discarica	Trasporto in discarica via gomma	Movimentazione interna e carico A
Global warming	kg CO ₂ eq	5,08E+07	3,54E+07	1,37E+07	1,61E+06
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	3,39E+01	2,25E+01	1,03E+01	1,03E+00
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	1,65E+06	1,30E+06	3,16E+05	2,85E+04
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	3,31E+05	2,70E+05	4,69E+04	1,42E+04
Fine particulate matter formation	kg PM _{2.5} eq	1,04E+05	8,39E+04	1,65E+04	3,52E+03
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _x eq	3,39E+05	2,76E+05	4,85E+04	1,45E+04
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	2,18E+05	1,76E+05	3,48E+04	7,11E+03
Freshwater eutrophication	kg P eq	1,18E+04	1,08E+04	9,57E+02	9,63E+01
Marine eutrophication	kg N eq	7,24E+02	6,26E+02	8,83E+01	9,22E+00
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	4,65E+08	1,20E+08	3,34E+08	1,14E+07
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	5,76E+07	5,73E+07	2,49E+05	2,36E+04
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	8,08E+07	8,02E+07	5,02E+05	3,70E+04
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	9,27E+06	8,97E+06	2,51E+05	4,51E+04
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	2,93E+09	2,92E+09	9,18E+06	5,96E+05
Land use	m ² a crop eq	1,38E+07	1,19E+07	1,80E+06	9,00E+04

Mineral resource scarcity	kg Cu eq	1,85E+05	1,43E+05	3,66E+04	4,91E+03
Fossil resource scarcity	kg oil eq	2,42E+07	1,88E+07	4,84E+06	5,20E+05
Water consumption	m ³	9,08E+05	8,80E+05	2,60E+04	2,00E+03

Tabella A - 4: Risultati LCA caratterizzati a livello midpoint per lo scenario - B smaltimento in discarica – trasporto via lago e via gomma

Impact category	Unit	Total	Smaltimento in discarica	Trasporto in discarica via gomma e via lago	Movimentazione interna e carico B
Global warming	kg CO ₂ eq	4,95E+07	3,54E+07	1,16E+07	2,41E+06
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	3,28E+01	2,25E+01	8,79E+00	1,50E+00
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	1,61E+06	1,30E+06	2,69E+05	4,00E+04
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	3,34E+05	2,70E+05	4,07E+04	2,36E+04
Fine particulate matter formation	kg PM _{2.5} eq	1,04E+05	8,39E+04	1,41E+04	5,72E+03
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _x eq	3,42E+05	2,76E+05	4,20E+04	2,40E+04
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	2,18E+05	1,76E+05	2,99E+04	1,15E+04
Freshwater eutrophication	kg P eq	1,17E+04	1,08E+04	8,16E+02	1,39E+02
Marine eutrophication	kg N eq	7,15E+02	6,26E+02	7,55E+01	1,32E+01
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	4,13E+08	1,20E+08	2,80E+08	1,25E+07
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	5,76E+07	5,73E+07	2,11E+05	3,19E+04

Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	8,07E+07	8,02E+07	4,24E+05	4,84E+04
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	9,26E+06	8,97E+06	2,15E+05	7,03E+04
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	2,92E+09	2,92E+09	7,75E+06	7,39E+05
Land use	m ² a crop eq	1,35E+07	1,19E+07	1,52E+06	1,12E+05
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	1,82E+05	1,43E+05	3,13E+04	7,11E+03
Fossil resource scarcity	kg oil eq	2,37E+07	1,88E+07	4,10E+06	7,70E+05
Water consumption	m ³	9,05E+05	8,80E+05	2,21E+04	2,78E+03

Tabella A - 5: Risultati LCA caratterizzati a livello midpoint per lo scenario C - preparazione per il riutilizzo

Impact category	Unit	Total	Trattamento	Trasporto all'impianto	Movimentazione interna e carico
Global warming	kg CO ₂ eq	1,95E+07	1,16E+07	5,86E+06	1,99E+06
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	1,29E+01	7,24E+00	4,41E+00	1,25E+00
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	4,85E+05	3,16E+05	1,35E+05	3,40E+04
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	1,63E+05	1,24E+05	2,00E+04	1,87E+04
Fine particulate matter formation	kg PM _{2.5} eq	4,15E+04	2,99E+04	7,06E+03	4,56E+03
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _x eq	1,66E+05	1,26E+05	2,07E+04	1,90E+04
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	8,52E+04	6,11E+04	1,49E+04	9,17E+03

Freshwater eutrophication	kg P eq	1,37E+03	8,43E+02	4,08E+02	1,16E+02
Marine eutrophication	kg N eq	1,29E+02	8,03E+01	3,77E+01	1,11E+01
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1,68E+08	1,41E+07	1,42E+08	1,19E+07
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	2,49E+05	1,15E+05	1,06E+05	2,76E+04
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	4,15E+05	1,58E+05	2,14E+05	4,24E+04
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	3,86E+05	2,21E+05	1,07E+05	5,70E+04
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	6,86E+06	2,27E+06	3,92E+06	6,64E+05
Land use	m ² a crop eq	1,71E+06	8,42E+05	7,67E+05	1,00E+05
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	3,95E+04	1,79E+04	1,56E+04	5,95E+03
Fossil resource scarcity	kg oil eq	6,37E+06	3,66E+06	2,07E+06	6,39E+05
Water consumption	m ³	9,72E+04	8,37E+04	1,11E+04	2,37E+03

Tabella A - 6: Risultati LCA caratterizzati a livello midpoint per lo scenario D - Riutilizzo come sottoprodotto

Impact category	Unit	Total	Ripristino	Trasporto	Movimentazione interna e carico
Global warming	kg CO ₂ eq	1,58E+07	2,10E+06	1,17E+07	1,99E+06
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	1,13E+01	1,23E+00	8,79E+00	1,25E+00
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	3,31E+05	2,83E+04	2,69E+05	3,40E+04
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	8,37E+04	2,52E+04	3,99E+04	1,87E+04
Fine particulate matter formation	kg PM _{2.5} eq	2,45E+04	5,84E+03	1,41E+04	4,56E+03

Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _x eq	8,58E+04	2,56E+04	4,13E+04	1,90E+04
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	5,03E+04	1,15E+04	2,96E+04	9,17E+03
Freshwater eutrophication	kg P eq	1,02E+03	9,22E+01	8,14E+02	1,16E+02
Marine eutrophication	kg N eq	9,48E+01	8,59E+00	7,51E+01	1,11E+01
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	2,98E+08	2,71E+06	2,84E+08	1,19E+07
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	2,57E+05	1,78E+04	2,12E+05	2,76E+04
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	4,94E+05	2,48E+04	4,27E+05	4,24E+04
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	3,23E+05	5,18E+04	2,14E+05	5,70E+04
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	8,79E+06	3,21E+05	7,81E+06	6,64E+05
Land use	m ² a crop eq	1,68E+06	5,02E+04	1,53E+06	1,00E+05
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	4,16E+04	4,57E+03	3,11E+04	5,95E+03
Fossil resource scarcity	kg oil eq	5,42E+06	6,58E+05	4,12E+06	6,39E+05
Water consumption	m ³	2,62E+04	1,67E+03	2,21E+04	2,37E+03