

Allegato 4



Scenari a lungo termine e confronto tecnologie per impianto finale



Studio preliminare dei processi di conversione energetica dei rifiuti indifferenziati

20/12/2021

Gruppo di lavoro:

Università degli Studi di Trento

Prof. Marco Ragazzi
Prof. Marco Tubino
Ing. Luca Adami
Ing. Marco Schiavon

Con i contributi di:

Prof. Gianni Andreottola
Dott. Pietro Castellani

Fondazione Bruno Kessler

Dott. Luigi Crema
Dott.ssa Eleonora Cordioli

Indice dei contenuti

1. Introduzione	1
2. Inquadramento e scenari per la gestione dei rifiuti urbani	1
2.1. Scenario 0: Stato di fatto	4
2.2. Scenario 1: Smaltimento dei rifiuti fuori Provincia	5
2.3. Scenario 2: Massimizzazione del recupero di materiale	6
2.4. Scenario 3: impianto di conversione energetica locale.....	7
2.4.1. Scenario 3.1: Impianto locale di conversione energetica dei rifiuti di taglia massima	8
2.4.2. Scenario 3.2: Impianto locale di conversione energetica dei rifiuti con invio parziale a TMB.....	8
2.4.3. Scenario 3.3: Impianto locale di conversione energetica dei rifiuti con invio totale a TMB.....	9
2.4.4. Scenario 3.4: Impianto locale di conversione energetica dei rifiuti con massimizzazione del recupero di materiale ed invio totale a TMB	10
2.5. Confronto scenari.....	12
3. Processi e tecnologie di conversione energetica dei rifiuti.....	13
3.1. Combustione	14
3.1.1. Combustione con moduli produttivi aggiuntivi	14
3.2. Gassificazione.....	15
3.2.1. Confronto gassificazione – combustione per conversione rifiuti.....	17
3.2.2. Utilizzo del syngas e tecnologie disponibili a livello commerciale.....	18
4. Aspetti ambientali e autorizzativi	20
4.1. Proposte di integrazioni alla normativa sulle emissioni da trattamento termico dei rifiuti.....	20
4.1.1. Introduzione	20
4.1.2. Il potenziale ruolo del cromo esavalente	22
4.1.3. PCDD/F e dl-PCB.....	27
4.1.4. Proposte di integrazione alla normativa in vigore	28
4.2. Considerazioni sul percorso autorizzativo	31
4.2.1. Finalità	31
4.2.2. Le tipologie progettuali e le soglie dimensionali	31
4.2.3. Fasi della procedura	33
4.2.4. Tempi della procedura	34



4.2.5.	Approfondimenti su impianti di combustione dei rifiuti	35
4.3.	Considerazioni localizzative	38
4.3.1.	Introduzione	38
4.3.2.	Elenco delle aree idonee individuate dal 4° Aggiornamento del Piano provinciale di Gestione dei Rifiuti (sez. Rifiuti Urbani).....	38
4.3.3.	Valutazione preliminare delle aree individuate	39
4.4.	Considerazioni sul concetto di <i>End-of-Waste</i>	41
4.5.	Matrici ambientali	42
5.	Confronto tra le soluzioni analizzate	44
6.	Conclusioni e raccomandazioni.....	46
	Bibliografia	47



Indice delle figure

Figura 1. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 0 (valori espressi in t/anno).....	5
Figura 2. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 1 (valori espressi in t/anno).....	6
Figura 3. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 2 (valori espressi in t/anno).....	7
Figura 4. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 3.1 (valori espressi in t/anno).....	9
Figura 5. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 3.2 (valori espressi in t/anno).....	10
Figura 6. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 3.3 (valori espressi in t/anno).....	11
Figura 7. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 3.4 (valori espressi in t/anno).....	12



Indice delle tabelle

Tabella 1. Contributi al presente documento: estensore principale.	1
Tabella 2. Dettaglio dei flussi di rifiuti da inviare a smaltimento, a recupero e a impianto di conversione locale o fuori Provincia per ciascuno scenario considerato.	3
Tabella 3. Riepilogo degli scenari considerati per la gestione dei rifiuti solidi urbani (valori espressi in t/anno).	13
Tabella 4. Tecnologie Waste-to-Energy, Waste-to-Chemicals e Waste-to-H ₂ disponibili in Europa e fuori Europa a livello commerciale per la conversione termo-chimica dei rifiuti tramite gassificazione.	21
Tabella 5. Valori limite di concentrazione al camino per impianti di incenerimento dei rifiuti (D.Lgs. 152/2006, aggiornato al 2014).	22
Tabella 6. Frazioni massiche relative agli inquinanti atmosferici tossici e persistenti normati dal D.Lgs. 152/2006 (aggiornamento al 2014) e concentrazioni al camino dei singoli metalli pesanti stimati sulla base dei valori garantiti cumulativi riferiti ad un caso di studio (ARPA Emilia-Romagna, 2011; Rada et al., 2021).	26
Tabella 7. Valori stimati della massima concentrazione media annua in aria ambiente a livello del suolo, della massima deposizione atmosferica media annua e rispettivi valori di R _c e HI per gli inquinanti tossici persistenti regolati dalla normativa (Rada et al., 2021).	26
Tabella 8. Dipendenza del rischio cancerogeno cumulato per via inalatoria dal contributo del Cr VI alla concentrazione al camino di cromo totale.	27
Tabella 9. Flussi di massa al camino stimati dallo Studio di Fattibilità relativo all'impianto di trattamento termico dei rifiuti in località Ischia Podetti e stima dei flussi per un impianto equivalente di combustione diretta che riceva in ingresso il quantitativo di rifiuti definito dagli Scenari 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4.	36
Tabella 10. Aree idonee individuate dal 4° Aggiornamento del Piano provinciale di Gestione dei Rifiuti (Provincia Autonoma di Trento, 2014).	39



1. Introduzione

L'Agenzia Provinciale per la Protezione dell'Ambiente (APPA), la Fondazione Bruno Kessler (FBK) e il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica (DICAM) dell'Università degli Studi di Trento (UniTrento) hanno individuato un'attività di ricerca di comune interesse denominata "Studio preliminare dei processi di conversione energetica dei rifiuti indifferenziati". Lo studio si propone di realizzare un'analisi dei diversi processi di conversione energetica dei rifiuti urbani indifferenziati con riferimento agli impianti di piccola scala, finalizzata sia alla produzione di pubblicazioni scientifiche, sia alla redazione di un documento che potrà essere assunto come riferimento scientifico a supporto dell'Aggiornamento del Piano Provinciale di Gestione dei Rifiuti da parte della Provincia Autonoma di Trento.

L'accordo tra le parti è stato sottoscritto il 18/10/2021 e prevede una durata dell'attività di ricerca di 6 mesi. Il presente documento rappresenta il primo report scientifico (scadenza metà dicembre 2021); il report scientifico definitivo verrà consegnato al termine del progetto. Le parti del report curate rispettivamente da FBK e UniTrento sono evidenziate in Tabella 1.

Tabella 1. Contributi al presente documento: estensore principale.

Capitolo	Autore principale
1. Introduzione	UniTrento
2. Inquadramento e scenari per la gestione dei rifiuti urbani	FBK
3. Processi e tecnologie di conversione energetica dei rifiuti	FBK
4. Aspetti ambientali e autorizzativi	UniTrento
5. Confronto tra le soluzioni analizzate	FBK e UniTrento
6. Conclusioni e raccomandazioni	UniTrento

2. Inquadramento e scenari per la gestione dei rifiuti urbani

Considerando il quadro attuale della gestione dei rifiuti urbani nella Provincia di Trento ed usandolo come riferimento, sono stati definiti degli scenari per lo smaltimento dei rifiuti volti ad analizzare alternative alla situazione attuale che possano offrire la possibilità, da un lato, di ridurre i volumi da inviare a discarica, dall'altro di limitare i volumi inviati fuori provincia, così da evitarne i costi corrispettivi.

Il quantitativo totale di rifiuti urbani considerati è pari a 283.461,00 t/anno, di cui 21.932,60 t/anno di rifiuti speciali assimilabili agli urbani, i quali non sono stati considerati ai fini del computo dei flussi di residuo indifferenziato nei vari scenari. Tutti i dati sono riferiti all'anno 2019. Si è scelto di considerare l'ultimo dato disponibile prima della pandemia COVID-19, perché questa può avere influenzato in maniera anomala i flussi.

In Tabella 2 sono riportati, per ciascuno scenario considerato, i flussi di rifiuti da inviare a smaltimento, a recupero e a impianto di conversione locale o fuori provincia, mentre la descrizione specifica è fatta qui di seguito.

Oltre allo Scenario 0, che rappresenta lo stato di fatto della gestione dei rifiuti urbani prodotti nella Provincia di Trento, sono stati analizzati tre scenari principali che propongono alternative volte a ridurre i quantitativi di rifiuti da smaltire in discarica, considerando sia i volumi disponibili (attualmente in esaurimento), sia il limite legislativo al 10% del peso di rifiuti urbani conferibili a discarica. Il Decreto Legislativo 36/2003 articolo 5, infatti, stabilisce che entro il 2035 la quantità di rifiuti urbani collocati in discarica non può superare il 10% del totale in peso dei rifiuti urbani prodotti dalla provincia.

Lo Scenario 1 prevede lo smaltimento fuori dal territorio provinciale di tutto il rifiuto non conferibile, sulla base del citato decreto, a discarica locale. Lo Scenario 2 prevede un tentativo di massimizzazione del recupero di materiale dal rifiuto residuo, al fine di diminuire la quantità di rifiuti da smaltire. Lo Scenario 3, suddiviso in quattro sotto-scenari, prevede invece la realizzazione a livello locale di un impianto di trattamento dei rifiuti per il recupero energetico o loro conversione in prodotti di alto valore aggiunto.

Risulta opportuno, prima di descrivere nel dettaglio i singoli scenari, definire le ipotesi assunte per la definizione degli stessi:

- i quantitativi di rifiuti sono espressi in tonnellate (t) e sono considerati su base annuale;
- la produzione di rifiuti urbani si assume pari a quella dei dati raccolti al 2019 (283.461,00 t) e costante negli anni a venire;
- ai fini dei calcoli di gestione del residuo, non sono considerati né la quota del rifiuto speciale proveniente dal trattamento dei rifiuti urbani (CER 19 12 12), né i rifiuti già stoccati in balle presso le discariche di Taio e di Ischia Podetti, la cui rimozione comporterebbe rischi legati al rilascio di sostanze nell'ambiente e richiederebbe quindi un'analisi dedicata;
- nel caso in cui la quota di rifiuti urbani smaltiti a discarica risulti inferiore al 10% dei rifiuti urbani prodotti, si considera la capacità residua per arrivare al 10% quale possibile destinazione di rifiuti speciali;
- la quota di rifiuti proveniente dalla raccolta differenziata e trattata in impianti di trattamento preliminare viene integralmente recuperata ad eccezione della frazione non recuperabile, dei rifiuti CER 19 12 12 (già esclusi dal computo) e degli inerti raccolti; il totale recuperato risulta così pari a 75.449,20 t;
- fatta eccezione per lo Scenario 3.1, si ipotizza il funzionamento dell'impianto di trattamento meccanico-biologico (TMB) oggi sito in Rovereto, per il quale si considera la capacità massima autorizzata di 57.000 t. Inoltre, per esso si considera la stessa resa del funzionamento attuale (dati 2019), ossia che i prodotti del trattamento siano così suddivisi:
 - 56,26% di CSS (combustibile solido secondario)
 - 37,05% di biostabilizzato (da trattamento del sottovaglio)
 - 6,69% di perdite
- il Decreto Legislativo 36/2003 (Allegato 8) prevede anche che il rifiuto urbano indifferenziato da destinare allo smaltimento in discarica venga prima stabilizzato. Si considera perciò che l'impianto di TMB, ove considerato, venga utilizzato per la stabilizzazione di tutto il residuo non recuperabile. Il processo di TMB non è l'unica modalità per garantire la stabilità biologica del rifiuto indifferenziato, ma tenendo conto della presenza sul territorio provinciale di un tale impianto, nella delineazione degli scenari lo si considera come unica opzione per tale scopo.



Tabella 2. Dettaglio dei flussi di rifiuti da inviare a smaltimento, a recupero e a impianto di conversione locale o fuori Provincia per ciascuno scenario considerato.

	A smaltimento [t/anno]		A recupero [t/anno]		Altri contributi [t/anno]		A trattamento termo-chimico [t/anno]				
SCENARIO 0	Biostabilizzato	3.513,30	Imp. Recupero RD	114.459,20	Inerti RD	974,76	In Trentino	TOTALE	0		
	Residuo da spazzamento	1.030,28	Da imp. tratt. prelim. RD	75.449,20	Perdite TMB	634,7	Fuori Trentino	Termovalorizzatore Bolzano	13.380,00		
	Ingombranti non recuperabili	9.879,00	Recupero spazzamento	7.357,72	TOTALE	1.609,46	0,57%	CSS	5.335,00		
	RD non recuperabile	680,24	Ingombranti recuperabili	150				TOTALE	18.715,00	6,60%	
	Residuo	28.685,00	TOTALE	197.416,12	69,64%						
	TOTALE	43.787,82	15,45%								
	Surplus a discarica	15.441,72									
	Limite a discarica (10% RU)	28.346,10									
SCENARIO 1	Biostabilizzato	14.140,63	Imp. Recupero RD	114.459,20	Perdite TMB	2554,60	In Trentino	TOTALE	0		
	Residuo da spazzamento	1.030,28	Da imp. tratt. prelim. RD	75.449,20	Inerti RD	974,76	Fuori Trentino	Termovalorizzatore Bolzano	13.380,00		
	Ingombranti non recuperabili	9.879,00	Recupero spazzamento	7.357,72	TOTALE	3529,36	1,25%	CSS	21.472,77		
	RD non recuperabile	680,24	Ingombranti recuperabili	150				TOTALE	34.852,77	12,30%	
	Residuo	28.685,00	TOTALE	197.416,12	69,64%						
	TOTALE	25.730,15	9,08%								
	Limite a discarica (10% RU)	28.346,10									
	Disponibilità discarica per speciali	2.615,95									
SCENARIO 2	Biostabilizzato	10.344,03	Imp. Recupero RD	116.459,20	Inerti RD	974,76	In Trentino	TOTALE	0		
	Residuo da spazzamento	1.030,28	Da imp. tratt. prelim. RD	75.449,20	Perdite TMB	1868,72	Fuori Trentino	Termovalorizzatore Bolzano	13.380,00		
	Ingombranti non recuperabili	9.026,10	Residuo recuperabile	8.247,68	TOTALE	2.843,48	1,00%	CSS	15.707,57		
	RD non recuperabile	680,24	Ingombranti recuperabili	1.002,90				TOTALE	29.087,57	10,26%	
	Residuo	28.685,00	Recupero spazzamento	7.357,72							
	TOTALE	21.080,65	7,44%	TOTALE	208.516,70	73,56%					
	Limite a discarica (10% RU)	28.346,10									
	Disponibilità discarica per speciali	7.265,45									
SCENARIO 3.1	Residuo da spazzamento	1.030,28	Imp. Recupero RD	114.459,20	Inerti RD	974,76	In Trentino	Residuo totale	51.548,00		
	TOTALE	1.030,28	0,36%	Recupero spazzamento	7.357,72	TOTALE	974,76	0,34%	Ingombranti non recuperabili	9.879,00	
	Limite a discarica (10% RU)	28.346,10		Da imp. tratt. prelim. RD	75.449,20			RD non recuperabile	680,24		
	Disponibilità discarica per speciali	27.315,82		Ingombranti recuperabili	150			TOTALE	62.107,24	21,91%	
TOTALE	27.315,82		TOTALE	197.416,12	69,64%						
SCENARIO 3.2	Biostabilizzato	3.513,30	Imp. Recupero RD	114.459,20	Inerti RD	974,76	In Trentino	Residuo non recuperabile	28.685,00		
	Residuo da spazzamento	1.030,28	Da imp. tratt. prelim. RD	75.449,20	Perdite TMB	634,7	Ingombranti non recuperabili	9.879,00			
	TOTALE	4.543,58	1,60%	Residuo recuperabile	0,00	TOTALE	1.609,46	0,57%	RD non recuperabile	680,24	
	Limite a discarica (10% RU)	28.346,10		Ingombranti recuperabili	150,00				CSS	5.335,00	
	Disponibilità discarica per speciali	23.802,52		Recupero spazzamento	7.357,72				Residuo non più destinato a Bolzano	13.380,00	
	TOTALE	23.802,52		TOTALE	197.416,12	69,64%			TOTALE	57.959,24	20,45%
SCENARIO 3.3	Biostabilizzato	19.097,71	Imp. Recupero RD	114.459,20	Inerti RD	974,76	In Trentino	Ingombranti non recuperabili	9.879,00		
	Residuo da spazzamento	1.030,28	Da imp. tratt. prelim. RD	75.449,20	Perdite TMB	3.450,12	RD non recuperabile	680,24			
	TOTALE	20.127,99	7,10%	Residuo recuperabile	0,00	TOTALE	4424,88	1,56%	CSS	29.000,17	
	Limite a discarica (10% RU)	28.346,10		Ingombranti recuperabili	150,00				TOTALE	39.559,41	13,96%
	Disponibilità discarica per speciali	8.218,11		Recupero spazzamento	7.357,72						
	TOTALE	8.218,11		TOTALE	197.416,12	69,64%					
SCENARIO 3.4	Biostabilizzato	16.774,92	Imp. Recupero RD	116.459,20	Inerti RD	974,76	In Trentino	Ingombranti non recuperabili	9.026,10		
	Residuo da spazzamento	1.030,28	Da imp. tratt. prelim. RD	75.449,20	Perdite TMB	3.030,50	RD non recuperabile	680,24			
	TOTALE	17.805,20	6,28%	Residuo recuperabile	2.401,65	TOTALE	4.005,26	1,41%	CSS	25.472,98	
	Limite a discarica (10% RU)	28.346,10		Ingombranti recuperabili	1.002,90				Tessili sanitari	1.867,95	
	Disponibilità discarica per speciali	10.540,90		Recupero spazzamento	7.357,72				TOTALE	37.047,27	13,07%
	TOTALE	10.540,90		TOTALE	202.670,67	71,50%					

Per alcuni scenari sono state fatte, in aggiunta alle precedenti, delle ipotesi più specifiche:

- nei casi in cui si prevede lo smaltimento fuori provincia di parte dei rifiuti (Scenari 1 e 2), si considera possibile l'invio al termovalorizzatore di Bolzano fino a 13.380,00 t di rifiuti urbani, pari alla quota attuale, eventualmente estendibile fino a 20.000 t previo accordo fra le Province di Trento e di Bolzano;
- per lo Scenario 2 si considera la possibilità di recuperare fino al 16% del rifiuto residuo, raggiungibile tramite un potenziamento della raccolta differenziata e l'attivazione della raccolta dei tessili sanitari;
- per lo Scenario 3.4 si considera la possibilità di recuperare fino al 9% del rifiuto residuo, raggiungibile tramite un potenziamento della raccolta differenziata (senza l'attivazione della raccolta dei tessili sanitari)
- per alcuni scenari (Scenari 2 e 3.4) si considera la possibilità di recuperare il 10% dei rifiuti ingombranti (1.002,90 t); per alcuni scenari (Scenari 2 e 3.4) si considera la possibilità di migliorare le rese del recupero della raccolta differenziata, ossia di conferire ulteriori 2.000,00 t del rifiuto residuo a impianti di recupero della raccolta differenziata;
- nei casi in cui è contemplata la realizzazione di un impianto di conversione locale dei rifiuti (Scenari 3), si ipotizza il riciclo completo nei settori civile e stradale delle ceneri in uscita dall'impianto

2.1. Scenario 0: Stato di fatto

Lo Scenario 0 rappresenta lo stato di fatto della gestione dei rifiuti urbani. Allo stato attuale (dati della gestione rifiuti 2019) la Provincia di Trento produce annualmente 283.461,00 t di rifiuti urbani. Di questi, 197.416,12 t (69,64%) sono recuperate direttamente dalla raccolta differenziata o da altro, i.e. impianto di trattamento preliminare della raccolta differenziata, spazzamento stradale, ingombranti. A smaltimento in discarica sono invece inviate 43.787,82 t (15,45%), che comprendono il residuo urbano, il residuo da spazzamento stradale non recuperabile, gli ingombranti non recuperabili, la frazione non recuperabile della raccolta differenziata ed il biostabilizzato dell'impianto di TMB sito a Rovereto. Come accennato nella definizione delle ipotesi, non è considerata la frazione di rifiuti speciali CER 19 12 12, che ammonta a 21.932,60 t (7,74%) e che deve trovare comunque destinazione in provincia o fuori provincia. Fuori provincia sono attualmente inviate a smaltimento 13.380,00 t di residuo destinate al termovalorizzatore di Bolzano e 5.335,00 t di CSS (Combustibile Solido Secondario) prodotto dall'impianto di TMB, per un totale di 18.715,00 t (6,60%). Infine, 1.609,46 t (0,57%) rappresentano inerti derivanti dalla raccolta differenziata e perdite derivanti dall'impianto di TMB.

Considerando la situazione attuale della gestione rifiuti urbani ed i dati aggiornati al 2019, rispetto al limite legislativo del 10% per il conferimento dei rifiuti a discarica, vi è un eccesso di rifiuti da smaltire pari a 15.441,72 t. Si delineano perciò nel seguito alcuni scenari che prevedono una serie di misure per lo smaltimento di questi rifiuti, sia esso fuori provincia oppure locale tramite realizzazione di un impianto di conversione energetica dei rifiuti sul territorio provinciale. Sono state inoltre considerate, per alcuni scenari, misure di miglioramento delle rese dalla raccolta differenziata e di massimizzazione del recupero di materiale, anch'esse volte a diminuire la quota di rifiuti urbani da destinare a smaltimento. In Figura 1 si riporta un quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 0.

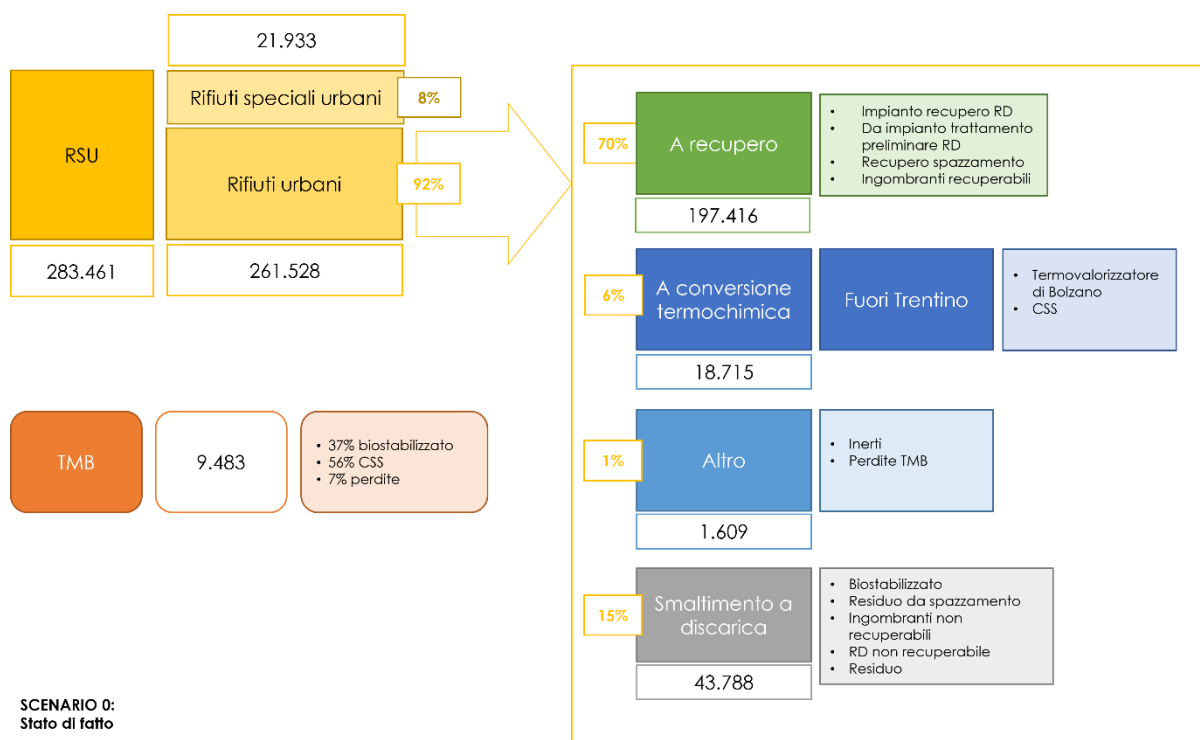


Figura 1. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 0 (valori espressi in t/anno).

2.2. Scenario 1: Smaltimento dei rifiuti fuori Provincia

Lo Scenario 1 prevede, a differenza di quanto accade oggi, la stabilizzazione del residuo urbano indifferenziato, come richiesto dal Decreto Legislativo 36/2003, e lo smaltimento fuori provincia (a impianto di termovalorizzazione o altro) non solo della quota attualmente già conferita al termovalorizzatore di Bolzano (13.380,00 t), ma anche del CSS prodotto dal TMB. L'obiettivo principale è quello di ridurre al minimo la quantità di rifiuti indifferenziati da gestire e smaltire localmente, così da evitare la saturazione dei volumi di discarica a disposizione. Vista la necessità di stabilizzare il rifiuto residuo, la quota totale di rifiuti da inviare a TMB comprende la quota già prevista attualmente (9.483,00 t) ed il residuo indifferenziato (28.685,00 t), per un totale di 38.168,00 t (13,46%). Il biostabilizzato (sottovaglio opportunamente trattato) prodotto dall'impianto di TMB viene dunque smaltito in discarica (14.140,63 t), mentre il CSS prodotto (21.472,77 t), utilizzabile come combustibile, inviato fuori provincia. Così facendo, il rifiuto totale a discarica, comprendente il biostabilizzato, il residuo da spazzamento stradale e le frazioni non recuperabili della raccolta differenziata e degli ingombranti, ammonta a 25.730,15 t (9,08%). Sulla base di questo scenario si crea dunque un margine, seppur molto ridotto, di conferimento a discarica di ulteriori rifiuti, per esempio gli speciali, pari a 2.615,95 t, senza superare il limite legislativo del 10%. Il totale inviato per lo smaltimento fuori provincia risulta invece considerevole, pari a 34.852,77 t (12,30%). Stante la situazione attuale per quanto riguarda la quantità di rifiuti urbani prodotti, la resa della raccolta differenziata ed il residuo già conferito fuori provincia, lo Scenario 1, pur non superando il limite legislativo del 10% dei rifiuti conferibili a discarica (arrivandoci tuttavia molto vicino), prevede necessariamente il conferimento di una consistente quota di rifiuti fuori dal territorio provinciale. Ciò comporta innanzitutto la necessità di ricercare disponibilità per lo

smaltimento degli stessi, ma anche di considerare il costo di tale operazione. In Figura 2 si riporta un quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 1.

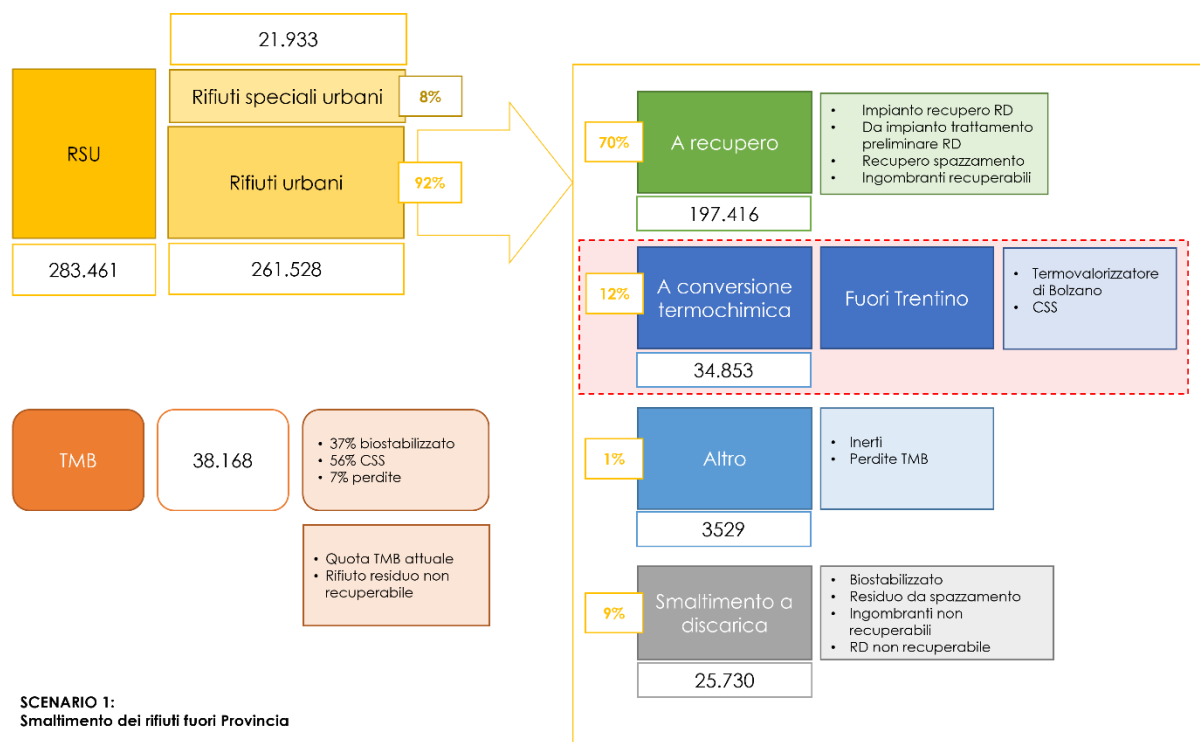


Figura 2. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 1 (valori espressi in t/anno).

2.3. Scenario 2: Massimizzazione del recupero di materiale

Lo Scenario 2 considera la possibilità di massimizzare il recupero di materiale sia dalla raccolta differenziata, sia dal rifiuto residuo raccolto. In particolare, si ipotizza:

- il miglioramento delle rese di raccolta differenziata, con un aumento del recupero di 2.000,00 t su base annuale, per un totale di 116.459,20 t, con conseguente riduzione del rifiuto residuo a 26.685,00 t
- il recupero del 16% del residuo totale raccolto (8.247,68 t), raggiungibile tramite un potenziamento della raccolta differenziata e l'attivazione della raccolta dei tessuti sanitari
- il recupero del 10% dei rifiuti ingombranti (1.002,90 t)

Ipotizzando queste migliorie a livello locale, il totale di rifiuti recuperati ammonterebbe a 208.526,70 t (73,56%), mentre il residuo da smaltire a discarica risulterebbe pari a 21.080,65 t (7,44%), tenendo conto che il rifiuto indifferenziato non recuperabile, prima dell'invio a discarica, deve essere stabilizzato. Vengono quindi inviati a TMB, oltre alla quota già inviata attualmente (9.483,00 t), anche 18.437,32 t di rifiuto indifferenziato, per un totale di 27.920,32 t (9,85%).

È utile osservare che la massimizzazione del recupero di materiale non è triviale considerando che attualmente (Scenario 0) già il 69,94% dei rifiuti urbani prodotti viene recuperato, e che lo Scenario 2 deve prevedere investimenti non irrilevanti che consentano azioni sul territorio per

incentivare ulteriormente la raccolta differenziata e/o la messa in funzione di un impianto di selezione sul residuo raccolto. Tuttavia, si raggiungerebbe una quota di residuo da smaltire che rientra nei limiti legislativi del 10% con una quantità di rifiuto da smaltire fuori provincia ridotta rispetto allo Scenario 1, ma comunque importante sia per volumi che per costi: 29.087,57 t (10,26%). Questi rifiuti comprendono la quota attualmente inviata all'inceneritore di Bolzano e il CSS prodotto dal TMB (15.707,57 t).

Considerati i volumi da smaltire in discarica, questo scenario consente di considerare la disponibilità per lo smaltimento in discarica di 7.265,45 t di rifiuti speciali, pur non oltrepassando la soglia del 10% di rifiuti urbani in discarica.

Tuttavia, soprattutto considerati i quantitativi da smaltire fuori provincia, lo Scenario 2 rivela i limiti di un'azione mirata esclusivamente ad un miglioramento della resa della raccolta differenziata e la necessità di valutare scenari alternativi che consentano di ridurre la quantità di residuo da smaltire senza la necessità di trovare ulteriore disponibilità per lo smaltimento all'esterno del territorio provinciale. In Figura 3 si riporta un quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 2.

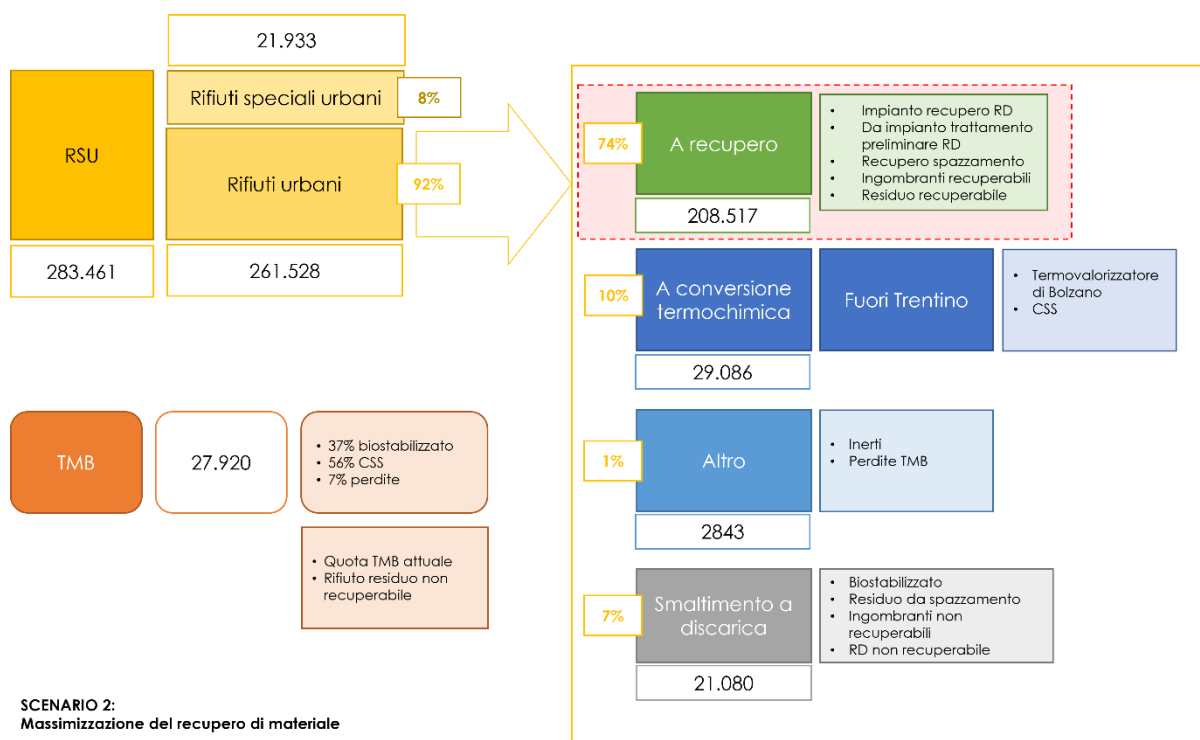


Figura 3. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 2 (valori espressi in t/anno).

2.4. Scenario 3: impianto di conversione energetica locale

Lo Scenario 3 considera la realizzazione di un impianto da localizzare nella Provincia di Trento per lo smaltimento dei rifiuti tramite loro conversione energetica, nell'ottica sia di annullare il conferimento fuori provincia del rifiuto residuo da smaltire, sia di minimizzare il conferimento a discarica locale per rientrare nei limiti del 10% stabilito dal succitato decreto e anzi rimanervi cautelativamente al di sotto. Si considera quindi che la quota di rifiuti oggi inviata al termovalorizzatore di Bolzano venga gestita completamente a livello locale.

Risulta inoltre importante osservare che questo scenario, suddiviso in più scenari secondari, dettagliati nel seguito, intende porre come obiettivo quello di valutare alternative di conversione del rifiuto urbano che portino benefici a livello locale. Da un lato la realizzazione di un impianto locale per lo smaltimento dei rifiuti consentirebbe un maggior livello di autonomia per quanto riguarda la gestione dei rifiuti, dall'altro alcune tecnologie di impianto prevedono la produzione di energia e/o prodotti chimici di varia natura, e quindi la valorizzazione del rifiuto urbano, nonché la possibilità di aprirsi a nuovi mercati strategici per la transizione energetica.

Si ricorda che per tutti i sotto-scenari qui di seguito considerati si ipotizza il riciclo completo delle ceneri prodotte dall'impianto nel settore edilizio.

Le tecnologie disponibili per la conversione energetica dei rifiuti sono invece discusse nel Capitolo 3 del presente documento.

2.4.1. Scenario 3.1: Impianto locale di conversione energetica dei rifiuti di taglia massima

Lo Scenario 3.1 prevede la realizzazione a livello locale di un impianto di conversione energetica dei rifiuti di taglia massima, ovvero si suppone di non inviare alcun rifiuto all'impianto di TMB e di trattare direttamente tutto il rifiuto urbano residuo in questo impianto di nuova costruzione. Si ipotizza quindi che le caratteristiche del rifiuto urbano, in particolare in termini di potere calorifico, siano tali da garantirne un corretto funzionamento. Il rifiuto considerato comprende le quote attualmente gestite dall'impianto di TMB e dal termovalorizzatore di Bolzano, nonché gli ingombranti non recuperabili e la frazione non recuperabile della raccolta differenziata, per un totale di 62.107,24 t (21,91% dei rifiuti urbani prodotti).

In questo modo risulta nulla la quota di rifiuti inviati per lo smaltimento fuori provincia e minimizzata la quota di rifiuti inviata a discarica, che comprenderebbe solamente il residuo da attività di spazzamento stradale (1.030,28 t, ossia 0,36% del totale di rifiuti urbani prodotti). Nell'ottica di lasciare la disponibilità residua in discarica per rifiuti speciali, si avrebbero a disposizione ben 27.315,82 t.

La costruzione ed il mantenimento di un impianto di conversione dei rifiuti di questa taglia potrebbe richiedere un investimento economico importante, che dipende innanzitutto dal tipo di impianto selezionato. Tuttavia, si osserva che in tal modo non solo verrebbero azzerati completamente i costi di smaltimento dei rifiuti fuori provincia, ma anche che alcuni tipi di impianto consentono la produzione di prodotti chimici o combustibili strategici che potrebbero consentire tempi di ritorno dell'investimento soddisfacenti. In Figura 4 si riporta un quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 3.1.

2.4.2. Scenario 3.2: Impianto locale di conversione energetica dei rifiuti con invio parziale a TMB

Lo Scenario 3.2 prevede la realizzazione di un impianto locale di trattamento dei rifiuti come per lo Scenario 3.1, ma con il funzionamento dell'impianto di TMB per il trattamento di 9.483,00 t di rifiuti (come da Scenario 0). Per cui, all'impianto locale di conversione energetica verranno inviati il CSS prodotto dal TMB (5.335,00 t), il residuo non recuperabile tal quale (28.685,00 t), gli ingombranti non recuperabili (9.879,00 t), la frazione di raccolta differenziata non recuperabile (680,24 t) e la quota di rifiuti attualmente inviata al termovalorizzatore di Bolzano, per un totale di 57.959,24 t. La taglia dell'impianto risulterebbe quindi ridotta di poco rispetto a quella dello Scenario 3.1, ma consentirebbe di rimuovere da parte del residuo

indifferenziato la frazione organica (che rimane come biostabilizzato all'uscita dell'impianto di TMB) e di migliorare la qualità del combustibile utilizzato nell'impianto di conversione energetica, con una quota di CSS.

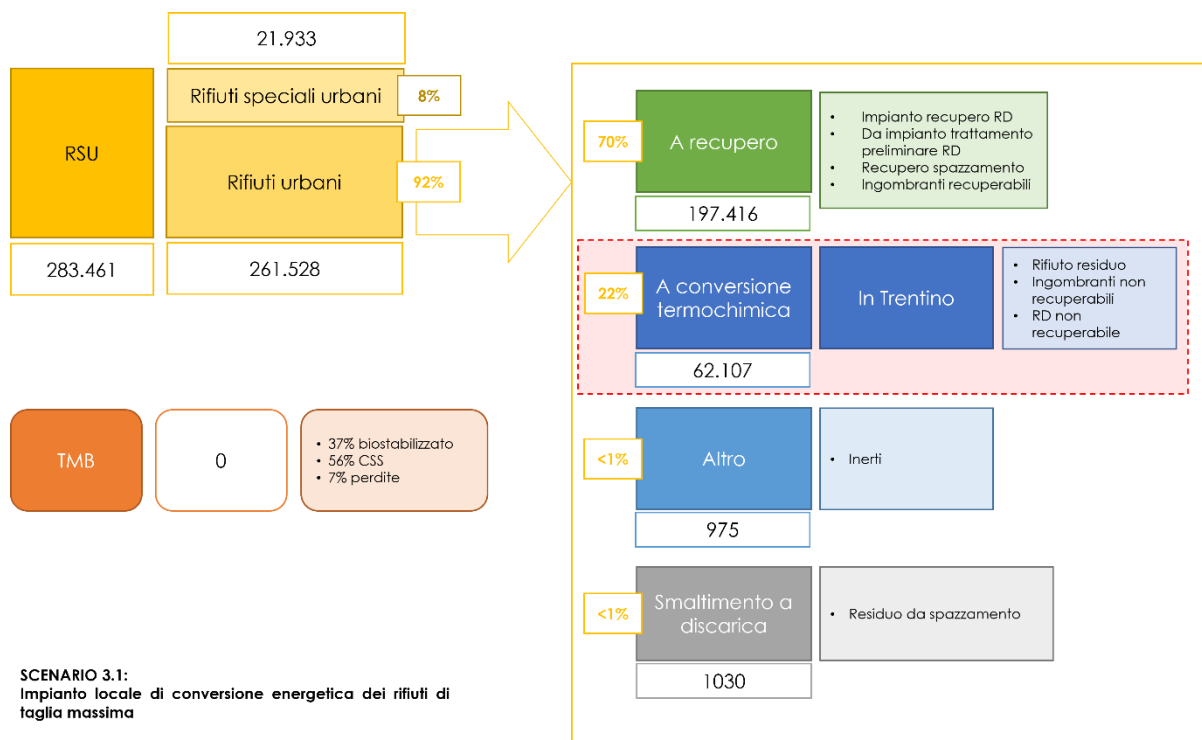


Figura 4. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 3.1 (valori espressi in t/anno).

In questo scenario il rifiuto destinato a smaltimento in discarica comprende il rifiuto biostabilizzato (3.513,30 t) ed il residuo da spazzamento stradale (1.030,28 t), per un totale di 4.543,58 t, pari all'1,60% dei rifiuti prodotti in provincia, lasciando quindi margine per un eventuale conferimento a discarica di ulteriori 23.802,52 t di rifiuti speciali. In Figura 5 si riporta un quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 3.2.

2.4.3. Scenario 3.3: Impianto locale di conversione energetica dei rifiuti con invio totale a TMB

Lo Scenario 3.3 prevede la realizzazione di un impianto locale di conversione energetica dei rifiuti che impieghi come *feedstock* gli ingombranti e la parte di raccolta differenziata non recuperabili (9.879,00 t e 680,24 t, rispettivamente), ed il CSS prodotto dall'impianto TMB. A differenza dello Scenario 3.2, tuttavia, si ipotizza che vengano sottoposti a trattamento meccanico-biologico non solo i rifiuti già attualmente inviati, ma anche i rifiuti oggi inviati al termovalorizzatore di Bolzano ed il residuo indifferenziato, per un totale di 51.548,00 t (18,19%), da cui vengono prodotte 29.000,17 t di CSS. Sulla base di questo scenario l'impianto locale dovrebbe gestire quindi in totale 39.559,41 t, di cui una buona parte (73,31%) è rappresentata da CCS, che vista l'alta densità energetica e l'omogeneità del materiale, costituisce il combustibile ideale per un impianto termo-chimico di conversione dei rifiuti. Per contro, si avrà una quantità di rifiuto biostabilizzato pari a 19.097,71 t da smaltire in discarica assieme al residuo da spazzamento stradale, per un totale inviato a discarica di 20.127,99 t, cioè il 7,10%

del totale di rifiuti urbani prodotti in provincia. Considerando la possibilità di inviare a discarica fino al 10% dei rifiuti prodotti, rimarrebbe margine per lo smaltimento di 8.212,11 t di rifiuti speciali.

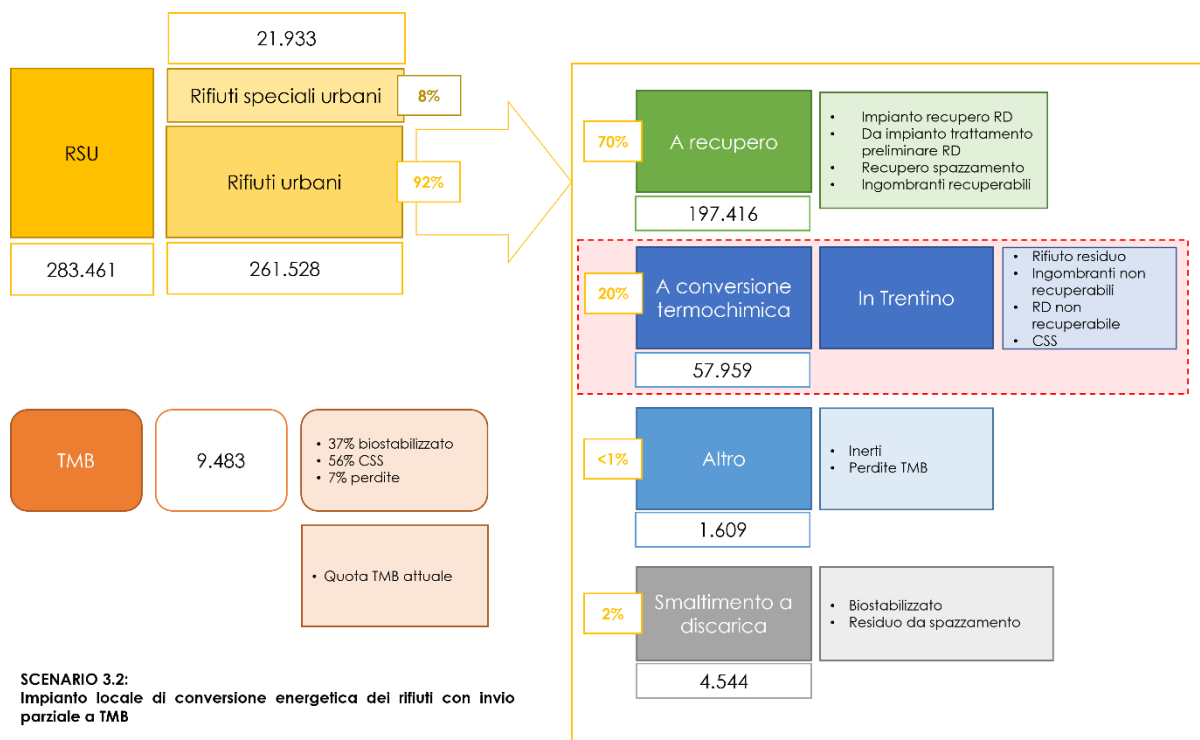


Figura 5. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 3.2 (valori espressi in t/anno).

La quantità di rifiuti inviata a TMB è molto elevata rispetto agli altri scenari considerati precedentemente e bisogna considerare che questi rifiuti dovrebbero essere trasportati tutti presso l'impianto di trattamento meccanico-biologico e poi trasportati in discarica (per la parte di biostabilizzato) o all'impianto di smaltimento dei rifiuti (per la parte di CSS). Tuttavia, la quantità rientra nei limiti di capacità autorizzati per l'impianto sito a Rovereto (57.000 t/anno). In Figura 6 si riporta un quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 3.3.

2.4.4. Scenario 3.4: Impianto locale di conversione energetica dei rifiuti con massimizzazione del recupero di materiale ed invio totale a TMB

È stato considerato un ultimo Scenario, 3.4, che prevede, come lo Scenario 3.3, la realizzazione di un impianto di conversione energetica dei rifiuti previo invio a TMB di tutto l'indifferenziato non recuperabile, ma con miglioramenti del recupero di materiale. In particolare, si considera:

- il miglioramento delle rese di raccolta differenziata, con un aumento del recupero di 2.000,00 t su base annuale, per un totale di 116.459,20 t, con conseguente riduzione del rifiuto residuo a 26.685,00 t

- il recupero del 9% del residuo totale raccolto (2.401,65 t), senza l'attivazione della raccolta dei tessili sanitari
- il recupero del 10% dei rifiuti ingombranti (1.002,90 t)

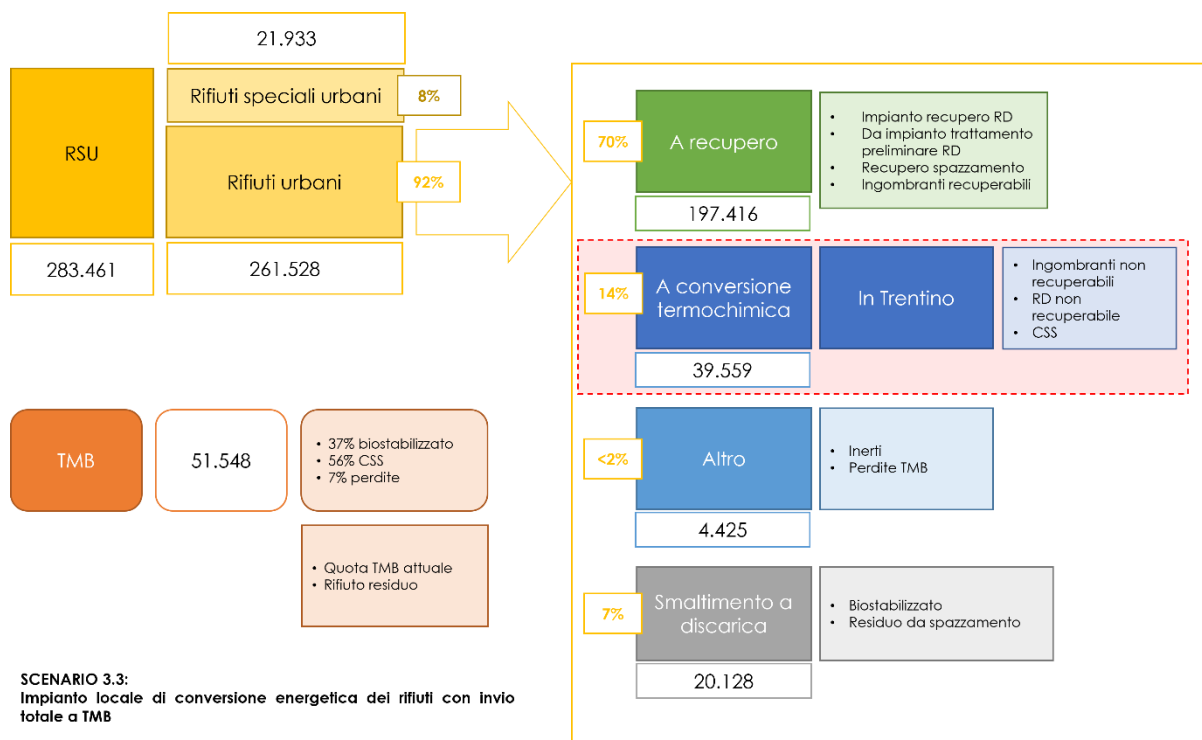


Figura 6. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 3.3 (valori espressi in t/anno).

Si considerano perciò le migliorie al recupero come nello Scenario 2, ma con un recupero inferiore del residuo indifferenziato (9% anziché 16%), perché si ipotizza che prevedendo la costruzione di un impianto locale per la conversione energetica dei rifiuti la quota del residuo afferente ai tessili sanitari possa esservi conferita direttamente insieme al residuo indifferenziato.

Tutto ciò consentirebbe di recuperare 202.670,67 t (71,50%) di rifiuti e comporterebbe un totale di 45.278,40 t (15,97%) da sottoporre a trattamento meccanico-biologico, da cui 25.472,98 t di CSS da usare come combustibile per l'impianto locale di conversione energetica. A quest'ultimo verrebbero conferiti anche la quota di tessili sanitari recuperata dall'indifferenziato, gli ingombranti non recuperabili e la quota non recuperabile di raccolta differenziata, per un totale di 37.047,27 t (13,07% dei rifiuti urbani prodotti). A discarica verrebbero conferiti invece il biostabilizzato prodotto dall'impianto di TMB ed il residuo da spazzamento stradale, ossia 17.805,20 t (6,28%), lasciando margine per ulteriori 10.540,90 t di rifiuti speciali. In Figura 7 si riporta un quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 3.4.

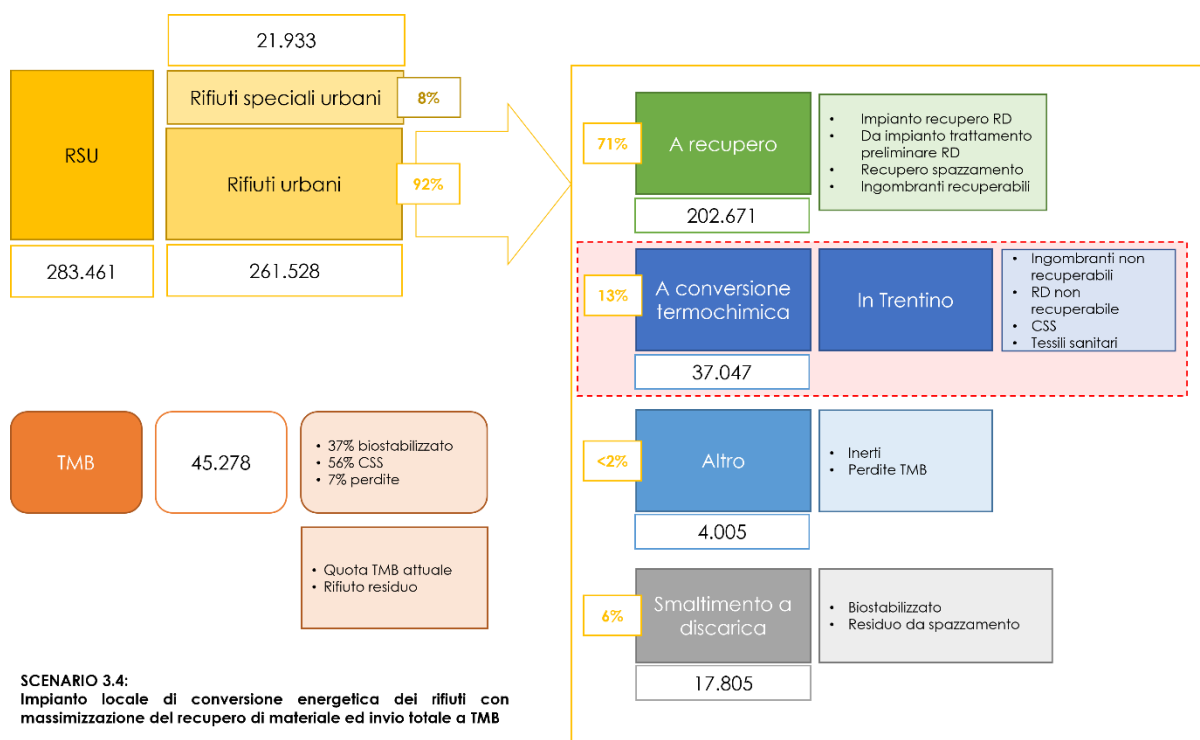


Figura 7. Quadro di riepilogo dei flussi di rifiuti considerati dallo Scenario 3.4 (valori espressi in t/anno).

2.5. Confronto scenari

In Tabella 3 sono riepilogati i dati principali degli scenari considerati. In particolare, vengono riportati:

- la quantità di rifiuti recuperati tramite raccolta differenziata ed eventuale selezione sul residuo raccolto
- ove considerato, la taglia dell'impianto di conversione energetica dei rifiuti di nuova realizzazione
- la quantità di rifiuti da stabilizzare in impianto di trattamento meccanico-biologico
- la quantità di rifiuti da smaltire in discarica
- la quantità di rifiuti da smaltire fuori dal territorio provinciale
- la disponibilità a discarica per rifiuti speciali (o altri) considerando il limite a discarica del 10% dei rifiuti prodotti

I numeri percentuali indicano la quota rispetto al totale di rifiuti urbani prodotti in Trentino (283.461,00 t/anno). Si fa presente che tutti gli scenari futuri, ad eccezione dello Scenario 3.1, tengono conto che esiste ed è già attivo in Trentino un impianto di TMB che, vista la recente realizzazione, andrebbe valorizzato per una gestione dei flussi. Inoltre, il ricorso al TMB può essere utilizzato per aumentare il PCI (Potere Calorifico Inferiore) dei rifiuti da destinare a trattamenti termici o termochimici ove dovesse risultare utile alle caratteristiche del processo a cui verrebbero destinati (non si tratta di produzione di energia ma piuttosto di concentrazione di parte dell'energia presente nei rifiuti in una minore massa).

Tabella 3. Riepilogo degli scenari considerati per la gestione dei rifiuti solidi urbani (valori espressi in t/anno).

	Recupero materiali	Impianto locale	Rifiuti a TMB	Rifiuti a discarica	Smaltimento fuori provincia	Disponibilità discarica per rifiuti speciali
Scenario 0	197.416,12 (69,64%)	no	9.483,00 (3,35%)	43.787,82 (15,45%)	18.715,00 (6,60%)	no
Scenario 1	197.416,12 (69,64%)	no	38.168,00 (13,46%)	25.730,15 (9,08%)	34.852,77 (12,30%)	2.615,95
Scenario 2	208.516,70 (73,56%)	no	27.920,32 (9,85%)	21.080,65 (7,44%)	29.087,57 (10,26%)	7.265,45
Scenario 3.1	197.416,12 (69,64%)	62.107,24 (21,91%)	no	1.030,28 0,36%	no	27.315,82
Scenario 3.2	197.416,12 (69,64%)	57.959,24 (20,45%)	9.483,00 (3,35%)	4.543,58 1,60%	no	23.802,52
Scenario 3.3	197.416,12 (69,64%)	39.559,41 (13,96%)	51.548,00 (18,19%)	20.127,99 (7,10%)	no	8.218,11
Scenario 3.4	202.670,67 (71,50%)	37.047,27 (13,07%)	45.278,40 (15,97%)	17.805,20 (6,28%)	no	10.540,90

3. Processi e tecnologie di conversione energetica dei rifiuti

Gli Scenari 3.1 – 3.4 valutano la realizzazione a livello locale di un impianto di conversione energetica dei rifiuti come alternativa allo smaltimento in discarica o fuori provincia, ma senza dare indicazione specifica della tipologia di impianto. Le tecnologie disponibili al giorno d'oggi sono diverse e fra loro molto differenziate, perché consentono di ottenere dai rifiuti solidi urbani non solo energia elettrica/termica, ma anche prodotti chimici ad alto valore aggiunto (combustibili, reagenti, ...), e ciascuna necessita della propria specifica componentistica.

La scelta di una tecnologia piuttosto che di un'altra può dipendere da diversi fattori:

- le caratteristiche chimico-fisiche del rifiuto solido raccolto e conferibile all'impianto (pezzatura, potere calorifico, contenuto di ceneri e contenuto di umidità)
- la tipologia di prodotto finale che si vuole ottenere dalla conversione energetica dei rifiuti (energia termica/elettrica, combustibili, reagenti chimici)
- la necessità o intenzione di sviluppare a livello locale una piattaforma di conversione dei rifiuti in prodotti chimici di valore e combustibili strategici

Il processo più comune di conversione dei rifiuti è sicuramente la combustione, altresì detta incenerimento, ma esistono anche altre tipologie di trattamento termico a temperature più o meno elevate, quali la pirolisi o la gassificazione, che consentono il recupero energetico dei rifiuti tramite processi in assenza di ossidazione o di ossidazione parziale. Le differenze fra questi processi verranno meglio descritte e confrontate nel seguito.

3.1. Combustione

La combustione (o incenerimento) è un processo di ossidazione completa e controllata che trasforma i rifiuti in una miscela gassosa contenente i prodotti della combustione (principalmente anidride carbonica e vapore acqueo) e in un residuo solido. Il calore generato dalle reazioni di combustione può essere ulteriormente convertito in energia elettrica, così da valorizzare il rifiuto e il suo smaltimento, tramite un impianto costituito da una turbina a vapore alimentata dal vapore generato e surriscaldato dal processo di combustione. L'energia termica in eccesso, inoltre, può essere recuperata per il teleriscaldamento o per altri processi che lo richiedano. Si parla dunque di impianto cogenerativo (produzione combinata di energia elettrica e termica) e di termovalorizzazione dei rifiuti, poiché dal loro smaltimento si ottiene come risultato non solo quello di ridurre notevolmente il volume e la massa originali e di renderli quindi più gestibili ai fini dello smaltimento in discarica, ma anche quello di produrre energia da destinarsi ad altri usi a partire da prodotti di scarto.

Le problematiche principali associate a questo tipo di conversione energetica dei rifiuti sono di carattere principalmente ambientale. Gli effluenti gassosi del processo di combustione dei rifiuti sono infatti diossine e furani, particolato, cloro, zolfo e altri prodotti derivanti da combustione incompleta o poco omogenea, oltre agli ossidi di azoto (NOx) che si formano alle temperature elevate raggiunte durante la combustione. Tutti questi inquinanti richiedono di essere trattati adeguatamente prima di essere rilasciati in atmosfera.

A livello impiantistico e di processo, un impianto di termovalorizzazione dei rifiuti completo deve comprendere, oltre alla camera di combustione una caldaia dove avviene (o si completa) la generazione di vapore da inviare a turbina, la turbina a vapore con alternatore per la produzione di energia elettrica, un sistema di recupero del calore per la fornitura all'utenza termica, e un sistema multi-stadio di trattamento per la pulizia dei fumi di combustione prima della loro espulsione tramite il camino. Per quanto riguarda il sistema di pulizia dei fumi a valle della combustione, si tratta in genere di elettrofiltri e/o filtri a maniche, che trattengono le particelle solide e permettono di rimuovere metalli pesanti (mercurio, cadmio, ...) e diossina. Si trovano poi assorbitori o reattori catalitici per la rimozione o abbattimento di altri inquinanti presenti nei fumi.

Per quanto riguarda i residui solidi del processo, le ceneri derivanti dal trattamento di pulizia dei reflui gassosi, definite leggere o volanti, costituiscono circa il 3 – 6% in peso del rifiuto in ingresso e sono rifiuti pericolosi, per cui devono essere adeguatamente stoccate e inviate a smaltimento o a trattamento. Le scorie o ceneri pesanti, costituite dal residuo non combustibile dei rifiuti, dai residui metallici e dal materiale organico incombusto, invece, possono costituire fino al 20 – 30% in peso del rifiuto in ingresso (a seconda della composizione dello stesso) e sono considerate rifiuti speciali non pericolosi per cui, previo trattamento, si può prevedere l'utilizzo nel settore edilizio o dei cementifici.

3.1.1. Combustione con moduli produttivi aggiuntivi

Nell'ottica di creare ulteriore valore aggiunto, si può considerare di integrare in questo tipo di sistemi di valorizzazione dei rifiuti, dei moduli aggiuntivi che sfruttino i prodotti o sottoprodotti del processo. In particolare, si citano le seguenti possibili soluzioni:

- utilizzo dell'energia elettrica prodotta dalla turbina per la produzione di idrogeno (H_2) e di ossigeno (O_2) dall'elettrolisi dell'acqua. L'idrogeno, quale vettore energetico, può essere successivamente utilizzato in loco o inviato ad una rete di utilizzo esterno dedicata; mentre l'ossigeno può essere impiegato nella caldaia quale agente ossidante per la combustione dei rifiuti
- cattura e stoccaggio della CO_2 presente nei fumi di combustione e suo utilizzo per la produzione di combustibili (e.g. conversione catalitica per la sintesi di CO, metanolo o idrocarburi)

Si tratta, tuttavia, di soluzioni che comporterebbero complessità ulteriori non irrilevanti, giustificabili solo se integrabili in una rete di utilizzo di questi prodotti aggiuntivi già prevista o sviluppata, visto che i prodotti principali della conversione dei rifiuti rimarrebbero comunque l'energia termica ed elettrica generate dal sistema cogenerativo. Inoltre, specificatamente per quanto riguarda l'utilizzo della CO_2 per la sintesi di combustibili, le tecnologie disponibili non sono ancora sufficientemente mature per garantire un ritorno economico dell'investimento.

3.2. Gassificazione

La gassificazione è il processo mediante il quale un materiale solido viene convertito in un gas combustibile tramite ossidazione parziale con un agente ossidante (aria, aria arricchita con ossigeno, oppure ossigeno puro). L'agente ossidante viene fornito in quantità sub-stechiometrica, ossia inferiore a quella necessaria per bruciare in maniera completa il combustibile (tipicamente 20 – 30% della quantità stechiometrica), così da convertirlo in idrogeno (H_2) e monossido di carbonio (CO), anziché ossidarlo completamente convertendolo in diossido di carbonio (CO_2) e acqua (H_2O). Il gas prodotto, denominato gas di sintesi o *syngas*, è una miscela di gas costituita principalmente da H_2 , CO, con quantità inferiori e variabili di CH_4 , CO_2 e, nel caso in cui sia utilizzata aria come agente ossidante, N_2 . Il processo di gassificazione con ossigeno è esotermico, quindi non richiede energia termica fornita dall'esterno, e può raggiungere temperature di 800 – 1200 °C.

Esistono diverse tipologie di gassificatori attualmente disponibili a livello commerciale, le più comuni sono:

- Gassificatore a letto fisso, costituito da un letto fisso di combustibile, immerso dall'alto. La configurazione può essere contro-corrente (*updraft*) se l'agente ossidante, immerso nella parte bassa del reattore, risale il reattore in contro-corrente rispetto al combustibile ed il *syngas* viene estratto dalla parte alta; oppure equi-corrente (*downdraft*) se la direzione del gas di sintesi è la stessa di quella del combustibile e l'estrazione avviene dalla parte bassa del reattore. In entrambe le configurazioni la conversione è molto efficiente e le scorie (ceneri anidre) sono estratte dalla parte inferiore del reattore. Il *syngas* prodotto risulta più pulito nel caso equi-corrente perché passa attraverso il letto caldo di *char* (il prodotto solido della gassificazione del rifiuto) favorendo la decomposizione dei composti più pesanti, ma potrebbe richiedere una fonte di calore esterna per mantenere temperature elevate, poiché il combustibile in ingresso non viene preriscaldato dal *syngas* in uscita.
- Gassificatore a letto fluido, in cui il combustibile risulta sospeso in una corrente ascendente di gas con eventuale aggiunta di materiale inerte fluidizzante (es. sabbia)

per aumentare lo scambio termico, garantendo una distribuzione molto uniforme della temperatura nella zona di gassificazione, un aumento della velocità di reazione e una maggiore resa complessiva del syngas.

- Gassificatore a letto trascinato, simile al gassificatore a letto fluido, ma in cui non viene utilizzato alcun agente fluidizzante e il combustibile si muove in equi-corrente con l'agente ossidante. Questa tipologia consente di raggiungere temperature molto elevate (1.200 – 1.500 °C) e di ottenere un syngas molto pulito, ma richiede elevate quantità di ossidante e sofisticati dispositivi di controllo che ne aumentano l'onerosità economica.

La composizione del gas di sintesi ottenuto e conseguentemente il suo contenuto energetico (potere calorifico) dipendono, oltre che dalla tipologia di reattore, anche dalle caratteristiche del materiale trattato, dall'agente ossidante utilizzato e dalle condizioni operative. Utilizzando come agente gassificante ossigeno commerciale, anziché aria, si otterrà per esempio un gas combustibile molto più concentrato, poiché privo di azoto, che, essendo inerte, diluisce il syngas abbassandone notevolmente il potere calorifico. In ogni caso, il syngas può successivamente essere utilizzato sia come combustibile in generatori di vapore, turbine a gas e motori a combustione interna per la produzione di energia elettrica e termica, sia come prodotto intermedio per la sintesi di combustibili e prodotti chimici. Questo aspetto non solo rende il processo di gassificazione particolarmente interessante per la sua versatilità e la possibilità di immagazzinare energia in forme diverse, ma consente anche di separare la produzione del syngas dal suo utilizzo, delocalizzandone la combustione o conversione in prodotti chimici di valore.

Relativamente al suo utilizzo per la sintesi di prodotti chimici, il syngas, dopo opportuni trattamenti di pulizia e raffinamento, può essere utilizzato per produrre:

- Metano, metanolo (MeOH), dimetil etere (DME), etanolo (EtOH), diesel (tramite processo Fischer-Tropsch)
- Gas naturale sintetico (SNG) via metanazione
- Idrogeno

La pulizia del gas di sintesi è fondamentale per rimuovere componenti che potrebbero renderne problematico l'utilizzo: particolato, composti acidi (HCl, H₂S, acidi organici) ed alcalini (NH₃), e soprattutto i *tar*. Questi ultimi sono composti di idrocarburi pesanti condensabili che possono formare depositi di sostanze viscosi e oleosi durante il raffreddamento del gas (già a temperature intorno ai 250 – 300 °C), sporcando e intasando superfici e componenti del sistema a valle del reattore di gassificazione. A seconda del suo utilizzo finale, il gas di sintesi necessita di un determinato grado di pulizia, che può richiedere l'impiego di filtri e torri di lavaggio (scrubber). La concentrazione di *tar* può anche essere ridotta preventivamente, operando il gassificatore ad alte temperature o aumentando il tempo di residenza del gas nel gassificatore, ma anche mediante l'utilizzo di catalizzatori che ne consentano la decomposizione a più basse temperature (anche inferiori a 800 °C).

Oltre al gas di sintesi, la gassificazione comporta la produzione di un residuo solido chiamato *char* (fino al 30%), che è composto principalmente da carbonio e inerti, e le cui caratteristiche chimico-fisiche, nonché la quantità prodotta, dipendono dalla matrice combustibile utilizzata e dalle condizioni operative del processo. Si è detto che le temperature di gassificazione arrivano fino a 1.200 °C circa, tuttavia esistono delle configurazioni particolari per cui nella

parte inferiore del reattore di gassificazione, dove vengono raccolte le scorie prodotte, si fa in modo di raggiungere e mantenere temperature molto più alte, anche fino a 2.000 °C, così da vetrificare il residuo solido inerte. Sottoposte alle alte temperature, le frazioni inerti si fondono e la colata viene convogliata in un bagno d'acqua di raffreddamento, dove solidifica formando granuli vetrificati che potrebbero essere impiegati, per esempio, per sottofondi stradali o conglomerati cementizi.

Nell'ambito della gassificazione, per completare la descrizione dei processi termo-chimici di conversione dei rifiuti, si cita anche la pirolisi. Si tratta di un processo di decomposizione termica, simile alla gassificazione per quanto riguarda la tipologia di prodotti ottenuti, ma che avviene in totale assenza di un agente ossidante e per il quale è necessario fornire calore dall'esterno (processo endotermico). Le temperature, inoltre, sono inferiori rispetto a quelle che si raggiungono in un reattore di gassificazione, tipicamente intorno a 500 – 550 °C e fino a 800 °C, ed il prodotto primario del processo non è tanto il *syngas*, quanto il prodotto liquido (olio di pirolisi), utilizzabile come combustibile o come materia prima destinata a successivi processi chimici. Come per la gassificazione, anche con la pirolisi si ha la produzione di un residuo carbonioso solido (*char*), ma in quantitativi molto maggiori. Questo, se possiede determinate caratteristiche fisico-chimiche, può essere ulteriormente trattato ed utilizzato come sostituto del carbone attivo in particolari applicazioni. La distribuzione dei prodotti gassoso (*syngas*), liquido (olio pirolitico) e solido (*char*) dipende notevolmente oltre che dalle caratteristiche del *feedstock* utilizzato per la pirolisi, dalle condizioni operative di processo, in particolare temperatura, tempo di residenza e *heating rate*.

Limitazioni di carattere tecnico e soprattutto economico (il processo di pirolisi richiede l'apporto di un'importante quantità di energia termica dall'esterno) hanno ostacolato lo sviluppo e la diffusione a livello commerciale di tecnologie di questo tipo e l'utilizzo della pirolisi come processo per la produzione di combustibili o prodotti chimici è ancora molto limitato.

3.2.1. Confronto gassificazione – combustione per conversione rifiuti

La principale caratteristica che differenzia il processo di gassificazione da quello di combustione è il prodotto primario del processo. Questo comporta che se da un lato la combustione dei rifiuti necessita di un impianto in cui a valle della produzione di energia elettrica/termica i gas di combustione vengono rilasciati, dopo opportuno trattamento, al camino, nel caso della gassificazione il *syngas* prodotto può essere utilizzato in un secondo momento e non necessariamente nello stesso impianto di produzione, e, a meno che il *syngas* non venga utilizzato direttamente come combustibile, non è necessario alcun camino per il processo in sé. Sono tuttavia necessari trattamenti del *syngas* che possono prevedere comunque rilasci in atmosfera e/o in soluzione acquosa che dipendono dalla tipologia specifica di processo considerata.

Qualora si considerasse l'utilizzo del *syngas* per la produzione di energia elettrica e termica, si deve tenere in conto che la sua combustione comporterebbe emissioni di inquinanti, seppur con alcune differenze rispetto alla combustione diretta del rifiuto solido.

La combustione comporta l'emissione di diossine e furani, particolato, cloro, zolfo e altri prodotti derivanti da combustione incompleta del *feedstock*, ma anche la produzione di ossidi di azoto (NOx) termici, ossia formati a causa delle temperature elevate determinate dalla combustione. Nel processo di gassificazione, invece, gli NOx da combustibile, ossia quelli

formati dall'azoto presente nel combustibile di partenza, grazie all'atmosfera riducente della gassificazione vengono convertiti in N_2 e NH_3 , e gli NO_x termici sono prodotti in quantità inferiori viste le temperature generalmente più basse rispetto alla combustione. Il processo di gassificazione in sé quindi comporta dei vantaggi, a livelli di emissioni, rispetto alla combustione, ma la combustione successiva del syngas potrebbe comunque causare la produzione di diossine, furani e NO_x . Sia nel caso della combustione, sia nel caso della gassificazione, la produzione di inquinanti dipende comunque molto dal tipo di reattore scelto. In generale, però, si osserva che la combustione omogenea in fase gassosa, quindi quella del syngas, è più efficiente della combustione del residuo solido, che è invece più complessa e difficile da operare e mantenere. Il syngas inoltre, è di più facile gestione rispetto al rifiuto solido, molto eterogeneo, ma trattandosi di un gas richiede particolare attenzione in termini di sicurezza e sofisticati sistemi di controllo.

Al di là della combustione, il principale punto di forza della gassificazione è sicuramente la versatilità del syngas prodotto, perché oltre ad essere usato esso stesso come combustibile, può essere convertito in prodotti chimici o combustibili che possono essere stoccati e utilizzati in altre applicazioni, creando un mercato di prodotti ad alto valore aggiunto e trasformando i rifiuti in una risorsa a tutto tondo. È vero che sono necessari sofisticati sistemi di pulizia del syngas anche molto costosi ed energivori, ma si osserva anche che, a parità di *feedstock* introdotto, soprattutto nel caso in cui si usi ossigeno commerciale (anziché aria), utilizzando molto meno ossidante rispetto alla combustione, gli impianti e i sistemi di *clean-up* hanno ingombri molto minori, perché il gas è molto meno diluito.

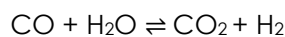
Per quanto riguarda le scorie residue, infine, la quantità prodotta dalla combustione è minore, perché si ha una resa di conversione del rifiuto più elevata, ma il *char* da gassificazione, se possiede determinate caratteristiche, può essere anch'esso valorizzato.

3.2.2. Utilizzo del syngas e tecnologie disponibili a livello commerciale

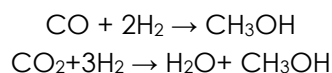
Come accennato, il gas prodotto dalla gassificazione dei rifiuti può essere utilizzato come combustibile per la produzione di energia elettrica ed energia termica in turbine a vapore, turbine a gas o motori a combustione interna, in maniera analoga a quanto avviene per un qualunque altro combustibile gassoso. Si parla, in questo caso, di *Waste-to-Energy*, proprio perché la conversione del rifiuto consente di produrre energia elettrica e/o termica, così come avviene in un termovalorizzatore dalla combustione diretta del rifiuto, anche se con differenze in termini di efficienza della combustione e di emissioni. Prima dell'invio al sistema cogenerativo, il syngas deve essere opportunamente trattato tramite appositi sistemi di filtrazione a secco o ad umido per rimuovere residui acquosi e contaminanti quali HCl, metalli pesanti, particolato, composti di zolfo e composti di azoto, così da ridurre adeguatamente le emissioni espulse al camino. Il livello di pulizia del syngas richiesto dipende innanzitutto dalla qualità dello stesso all'uscita del gassificatore, che dipende a sua volta dal *feedstock* utilizzato, dalla tipologia di reattore e dalle condizioni di processo, e dalla qualità richiesta dall'utenza finale. Qualora il syngas fosse destinato a combustione in una turbina a gas, per esempio, dovrà contenere livelli molto bassi di contaminanti per evitare il danneggiamento delle pale. Sono inoltre da considerare gli aspetti ambientali per quanto riguarda le emissioni al camino, a cui è dedicato un capitolo specifico del documento. Anche la composizione del syngas e il suo contenuto energetico devono essere adeguati, ma nel caso di combustione

del *syngas*, a differenza di altre sue applicazioni, generalmente non vi sono restrizioni particolari e non sono richieste specifiche quantità di H₂ o di CO per il corretto funzionamento dell'impianto cogenerativo, purché le efficienze di produzione di energia elettrica e termica siano a livelli soddisfacenti.

L'altra principale applicazione del *syngas* è quella delle tecnologie *Waste-to-Chemicals*, ossia la conversione del *syngas* prodotto dalla gassificazione dei rifiuti in prodotti chimici ad alto valore aggiunto, quali metanolo, dimetil etere, etanolo, o diesel. Attraverso una serie di passaggi, il *syngas*, dopo il trattamento necessario per rimuovere i contaminanti in esso contenuti, viene sottoposto ad una serie di processi che ne modificano la composizione, aumentandone per esempio il contenuto di H₂ e riducendone quello di CO a seconda di quanto richiesto dall'utilizzo finale. Per esempio, per la sintesi di metanolo (MeOH), il *syngas*, dopo opportuno lavaggio e filtrazione, viene generalmente inviato ad un reattore di Water Gas Shift (WGS), in cui si ha la riduzione di CO e l'aumento della frazione di H₂ secondo la reazione detta, appunto, di water-gas-shift:



Che consente di raggiungere rapporti H₂/CO di circa 2:1, come richiesto per la sintesi di metanolo. Successivamente, dopo la rimozione della CO₂ e dell'acqua residua, in un altro reattore catalitico ad alta temperatura ed alta pressione, dal *syngas* viene prodotto il metanolo (CH₃OH) secondo le reazioni:

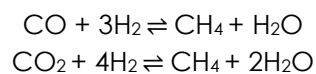


Per la produzione di dimetil etere (DME) da *syngas*, il processo è lo stesso di quello citato per la produzione del metanolo. Infatti, si può produrre DME (CH₃OCH₃) dal metanolo in un ulteriore reattore catalitico in cui avviene la disidratazione del metanolo:



Oppure direttamente dal *syngas*, combinando in un'unica unità di processo sia la sintesi che la disidratazione del metanolo.

Tramite metanazione, invece, il *syngas* può essere convertito in appositi reattori catalitici in gas sintetico naturale (SNG), composto principalmente da metano (CH₄) secondo le reazioni:



con appositi passaggi intermedi per la rimozione dell'acqua residua e della CO₂.

Nel caso l'obiettivo finale fosse quello di produrre idrogeno viene utilizzato, come per il processo di produzione del metanolo, un reattore WGS che consente di aumentare la frazione di H₂ nel *syngas*, a cui viene fatto seguire, dopo il sequestro della CO₂, un'unità di Pressure Swing Adsorption (PSA), in cui, tramite un processo di assorbimento ad alta pressione, si può aumentare la purezza dell'idrogeno fino al 99,99%.

Le tecnologie a disposizione per la conversione del *syngas* sono molteplici e collaudate; sono infatti le stesse tecnologie impiegate per la produzione di metanolo, DME, H₂, etc. dal reforming del metano contenuto nel gas naturale. Tuttavia, in Europa, nonostante l'interesse crescente in questa direzione, attualmente non esistono ancora impianti di *Waste-to-Chemicals* o *Waste-to-H₂* che producano i prodotti chimici citati o idrogeno a partire dalla gassificazione del rifiuto solido, se non a livello di impianti pilota. In ambito extra-europeo, invece, sono nate nuove tecnologie che combinano la gassificazione dei rifiuti con processi

di conversione del syngas in prodotti ad alto valore aggiunto. Come *feedstock* vengono utilizzati rifiuti solidi urbani, ma anche residui plastici e industriali, e gli impianti ne trattano quantitativi molto elevati, anche 100.000 t annue o più. Sono tuttavia operative anche soluzioni modulari di taglia ridotta, con linee che trattano fino a 20.000 t annue di rifiuti. A tal proposito si menziona che una tecnologia modulare (affidente all'azienda svizzera Eppm ag) è al momento in fase di autorizzazione per alcuni test nell'ambito *Waste-to-Energy* in un sito in provincia di Trento. In Tabella 4 sono state raccolte alcune tecnologie con impianti di scala commerciale di interesse per il presente studio, con indicazione della tipologia di processo impiegata, la destinazione d'uso del syngas prodotto dalla gassificazione e la taglia tipica degli impianti realizzati (lo stesso non è stato fatto per tecnologie di combustione in quanto già note).

FBK dispone di ulteriori informazioni sulla produzione energetica ed i costi di investimento ed operativi stimati per la produzione di energia o per la sintesi di prodotti chimici per le tecnologie individuate. Nella seconda fase della ricerca si ricontatteranno le aziende per rendere più omogenee e quindi più confrontabili tali informazioni a fini scientifici, indipendentemente dalle dinamiche decisionali trentine.

4. Aspetti ambientali e autorizzativi

4.1. Proposte di integrazioni alla normativa sulle emissioni da trattamento termico dei rifiuti

4.1.1. Introduzione

Negli ultimi decenni, l'Unione Europea ha imposto agli Stati Membri norme sempre più restrittive sulle emissioni di inquinanti atmosferici dal settore della termovalorizzazione dei rifiuti. L'introduzione delle migliori tecnologie disponibili (BAT – *Best Available Techniques*) (JRC, 2019) e di valori limite sempre più cautelativi di concentrazione al camino di impianti di combustione dei rifiuti ha determinato una sostanziale riduzione degli impatti del settore rifiuti sulla salute pubblica negli ultimi anni (Costa et al., 2019). Una delle principali conseguenze di queste migliorie è la riduzione delle emissioni di diossina osservate in impianti moderni (Nadal et al., 2019). I risultati raggiunti in termini di contenimento delle emissioni di diossina, che si traducono in una riduzione degli impatti a scala locale, ha posto in secondo piano questa famiglia di composti rispetto ad altri composti, che richiedono quindi particolare attenzione al fine di rendere sempre più compatibile la gestione dei rifiuti con l'ambiente e la salute pubblica.

Nello specifico, tra gli inquinanti atmosferici di particolare interesse dal punto di vista del potenziale rischio per la salute, emergono i metalli pesanti, la cui presenza nei fumi rilasciati da impianti di incenerimento dei rifiuti era già nota, ma che sono stati considerati di secondo piano quando il tema della diossina ed il nesso con la combustione di rifiuti è emerso prepotentemente nel corso degli anni '90.



Tabella 4. Tecnologie Waste-to-Energy, Waste-to-Chemicals e Waste-to-H₂ disponibili in Europa e fuori Europa a livello commerciale per la conversione termochimica dei rifiuti tramite gassificazione.

Azienda	Paese	Tecnologia	Tipologia processo	Feedstock	Prodotti	Sottoprodotti	Impianti operativi	Taglia impianti
Ebara Corporation	Giappone	TwinRec	Gassificazione a letto fluido	RSU	Syngas per produzione energia elettrica	Riciclo metalli; ceneri vetrificate	Giappone	Impianti da 19.000 – 165.000 t/anno rifiuti
Enerkem	Canada		Gassificazione a letto fluido bollente (bubbling fluidized bed)	RSU	Syngas per produzione MeOH, ETOH		Canada	Impianti da 100.000 t/anno rifiuti
Entech	Australia	ENTECH-WtGas-RES™	Gassificazione a bassa/alta temperatura	RSU, CSS, rifiuti industriali	Syngas per produzione H ₂ , combustibili, energia elettrica		Polonia, Malesia, Taiwan, Singapore, Corea	Impianti da 72 t/giorno rifiuti
Eppm ag	Svizzera	TWO	Gassificazione a letto fisso a bassa temperatura	RSU, rifiuti industriali	Syngas per produzione energia elettrica/termica		Stati Uniti, Austria, Svizzera	Moduli da 15 – 150 t/giorno rifiuti
JFE + Johnson Matthey, Lanzatech (MyRechemical)	Giappone	Thermoselect	Gassificazione a letto fluido o a letto fisso	RSU, plasmix	Syngas per produzione energia elettrica/termica; MeOH; ETOH	Residuo vetrificato solido	Giappone	Moduli da 150 t/giorno rifiuti; impianti da 100.000 t/anno rifiuti
Kew Technology	Regno Unito	SEC Technology	Gassificazione a letto fluido pressurizzato	RSU, CSS	Syngas per produzione H ₂ , DME, MeOH, jet fuel		Regno Unito (impianti pilota full-scale)	Moduli da 20.000 t/anno rifiuti pretrattati. Output: 3.500 kg/giorno H ₂ ; 5.000 kg/giorno DME; 300 L/giorno jet fuel
OMNI Conversion Technologies + KP Engineering	Canada	OMNI200™	Gassificazione al plasma (gassificazione + raffinamento gas tramite torcia al plasma)	RSU, residui plastici, cippato di legno e altre biomasse legnose	Syngas per produzione H ₂ , combustibili, prodotti chimici, SNG, energia elettrica	OmniRock™ (residuo vetrificato); recupero acqua; recupero calore	Canada	Moduli da 67.000 t/anno rifiuti. Output: 5.000 t/anno H ₂

4.1.2. Il potenziale ruolo del cromo esavalente

4.1.2.1. Aspetti critici dell'attuale assetto normativo

Il controllo dei metalli pesanti emessi da impianti di incenerimento dei rifiuti segue le prescrizioni della Direttiva Europea 75/2010/UE, che a livello nazionale, recepito dal D.Lgs. 46/2014, va ad integrare il D.Lgs. 152/2006 (Allegato 1 al titolo III-bis alla Parte Quarta) e stabilisce complessivamente tre valori limite per metalli pesanti:

- un valore limite di concentrazione al camino specifico per il mercurio;
- un valore limite di concentrazione al camino per la somma di cadmio e tallio;
- un valore limite di concentrazione al camino per la somma di un gruppo ampio di composti (antimonio, arsenico, cromo totale, cobalto, piombo, manganese, nichel e vanadio).

In Tabella 5, si riportano i valori limite di concentrazione al camino per i diversi contaminanti considerati dal D.Lgs. 152/2006 (aggiornato al 2014).

Tabella 5. Valori limite di concentrazione al camino per impianti di incenerimento dei rifiuti (D.Lgs. 152/2006, aggiornato al 2014).

Composto	Concentrazione limite al camino	Unità di misura
Polveri sospese totali	10	mg/Nm ³
Carbonio organico totale	10	mg/Nm ³
Composti inorganici del cloro	10	mg/Nm ³
Composti inorganici del fluoro	1	mg/Nm ³
Ossidi di zolfo	50	mg/Nm ³
NO _x	200	mg/Nm ³
CO	50	mg/Nm ³
NH ₃	30	mg/Nm ³
Mercurio	0,05	mg/Nm ³
Cadmio e Tallio	0,05	mg/Nm ³
Antimonio, Arsenico, Cobalto, Cromo totale, Manganese, Nichel, Piombo, Vanadio	0,5	mg/Nm ³
Idrocarburi policiclici aromatici	0,01	mg/Nm ³
Diossine e furani	0,1	ng _{TEQ} /Nm ³
Policlorobifenili (diossina simili)	0,1	ng _{TEQ} /Nm ³

Nel caso dei metalli pesanti, uno schema di prescrizioni siffatto, che prevede valori limite cumulativi per gruppi di contaminanti, comporta delle criticità che potrebbero tradursi in impatti potenzialmente rilevanti sul territorio situato nei pressi di un impianto di trattamento termico dei rifiuti. Con l'eccezione della prescrizione specifica per il mercurio, infatti, le rimanenti due prescrizioni coinvolgono gruppi più o meno allargati di metalli pesanti caratterizzati da diversi livelli di tossicità e con effetti di tipo molto diverso sulla salute. Nel caso del valore limite di concentrazione al camino per la somma di cadmio e tallio, ad esempio, la normativa include nella stessa categoria un composto di dimostrata natura cancerogena per l'uomo (il cadmio) ed un composto tossico ma non cancerogeno (il tallio) (Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro, 2021). Analogamente, lo stesso problema si pone nel caso del secondo gruppo di metalli pesanti, tra i quali figurano cancerogeni dimostrati per l'uomo (nichel e arsenico) e il parametro "cromo totale", che può includere a sua volta le specie cromo trivalente (Cr III) e cromo esavalente (Cr VI). Quest'ultimo è anch'esso un inquinante cancerogeno dimostrato per l'uomo. Secondo l'Agenzia per la protezione ambientale degli U.S.A. (US EPA), il Cr VI è caratterizzato da un potenziale cancerogeno di 2–

3 ordini di grandezza superiore rispetto agli altri metalli pesanti cancerogeni regolati dalla normativa (US EPA, 2019). La normativa attuale, pertanto, fornisce un valore limite cumulativo per otto metalli pesanti, senza alcuna considerazione specifica del livello di tossicità di ciascuno di essi. Si tratta di un approccio controverso, in quanto la non necessità di procedere ad una caratterizzazione del Cr VI può rendere incontrollabili gli impatti dei trattamenti termici dei rifiuti. Potenzialmente, infatti, un impianto che rispetti i limiti per i gruppi di metalli riportati in Tabella 5 potrebbe emettere solo cadmio e Cr VI (il metallo dal potenziale cancerogeno maggiore) rispettivamente a concentrazioni al camino di 0,05 e 0,5 mg/Nm³. Come si vedrà al paragrafo 4.1.2.3, tale situazione può rivelarsi incompatibile con il territorio nei pressi di un impianto e quindi è opportuno integrare l'approccio previsto dalla normativa.

4.1.2.2. Meccanismo di interazione con l'organismo umano

Se combinato con potassio o sodio in forma di cromati, il Cr VI diviene rapidamente solubile in acqua (US EPA, 2019; Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro, 2021). Questa caratteristica, combinata con la sua tossicità, rende il Cr VI un contaminante di interesse per la risorsa idrica in prossimità di sorgenti di tale inquinante (Tiwari et al., 2019). Tuttavia, mentre l'ingestione di acqua o cibo contaminato è ancora considerato un percorso di esposizione secondario, l'inalazione di Cr VI ha mostrato evidenti relazioni causa-effetto per lo sviluppo di diversi tipi di cancro, tra i quali quello dei polmoni, del naso e del seno (Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro, 2021). Contrariamente al Cr III, il Cr VI è in grado di penetrare all'interno della membrana cellulare. Il Cr VI non è direttamente in grado di modificare il DNA, ma la riduzione del Cr VI, a livello intracellulare, può generare livelli elevati di Cr III che si considera essere il responsabile per il danno al DNA (Sun et al., 2015).

La recente Direttiva Europea 2398/2017/UE evidenzia quanto sia rilevante il ruolo del Cr VI in termini di potenziali impatti sulla salute: la norma riduce infatti il valore limite sugli ambienti di lavoro per la concentrazione di Cr VI in aria ambiente a 0,005 mg/m³, che peraltro si auspica sia ulteriormente ribassato, considerato il potenziale cancerogeno associato a tale valore (cfr. paragrafo 4.1.2.3).

Storicamente associato ad altre tipologie di impianti industriali, quali attività di verniciatura e di rivestimento di superfici metalliche, cementifici, industrie chimiche e ceramiche, industrie automobilistiche, l'industria del cuoio e raffinerie (Saha et al., 2011), negli ultimi anni la letteratura scientifica ha dimostrato che gli impianti di trattamento termico dei rifiuti possono essere una sorgente non trascurabile di Cr VI (Miyake et al., 2017; Rada et al., 2021). Secondo la letteratura, la fonte principale di Cr VI in inceneritori di rifiuti è l'ossidazione del triossido di dicromo (Cr₂O₃) ad opera dell'ossido di calcio (CaO) a temperature di poco superiori a 500°C. Il Cr₂O₃ è un comune costituente dei forni per il trattamento termico dei rifiuti, che è ampiamente impiegato per la sua elevata resistenza alla corrosione (Nath et al., 2018).

4.1.2.3. Esempio numerico

La metodologia di valutazione del rischio per la salute

La stima del rischio per la salute da inquinanti atmosferici è convenzionalmente svolta attraverso una metodologia a più step, nota come l'analisi di rischio per la salute e si riferisce agli inquinanti tossici persistenti. Nel caso dell'incenerimento di rifiuti, con riferimento al D.Lgs. 152/2006 (aggiornamento 2014), gli inquinanti tossici persistenti sono individuati dai metalli

pesanti, da diossine e furani (PCDD/F), dai policlorobifenili diossina-simili (dl-PCB) e dagli idrocarburi policiclici aromatici (IPA).

Il primo *step* di questa metodologia consiste nella caratterizzazione delle emissioni, ossia nel reperimento di informazioni esaustive sulla composizione dell'effluente gassoso rilasciato da ciascuna fonte, sulla sua temperatura, il suo flusso di massa, la velocità di uscita al camino e i periodi di funzionamento della sorgente di emissione durante l'anno.

Una volta caratterizzate le emissioni, queste ultime sono simulate applicando opportuni modelli meteorologici e di dispersione in atmosfera degli inquinanti emessi su base annua, intervallo minimo per svolgere una valutazione di rischio per la salute. Il risultato consiste in mappe di concentrazioni in aria ambiente e di deposizioni al suolo degli inquinanti simulati, che rappresentano informazioni fondamentali per poter condurre analisi di rischio cancerogeno e tossico (non cancerogeno).

Il successivo *step* consiste nella caratterizzazione dei percorsi di esposizione prevalenti a cui può essere soggetta la popolazione insediata nell'area della sorgente emissiva. I contaminanti atmosferici possono infatti penetrare nell'organismo umano direttamente per inalazione, per contatto dermico con suolo e colture esposte a deposizione atmosferica dei contaminanti, per ingestione accidentale di suolo (percorso rilevante per i bambini), per ingestione di cibo contaminato e consumo di prodotti derivati da cibo contaminato (Schiavon et al., 2019). In via cautelativa, nelle analisi di rischio si assume che la popolazione *target* consumi esclusivamente alimenti prodotti nella zona soggetta alle emissioni delle attività considerate. Per facilitare l'individuazione dei percorsi di esposizione, si ricorre generalmente a mappe di uso del suolo, che sono in grado di indicare le colture principalmente presenti nell'area. Integrando queste informazioni con statistiche sul consumo di alimenti della popolazione *target*, diviene possibile ricostruire il percorso espositivo relativo alla dieta locale. Sulla base dei percorsi di esposizione individuati, sulle abitudini della popolazione locale e sui risultati dell'approccio modellistico, è possibile, attraverso l'applicazione di formulazioni consolidate negli anni e relative all'analisi di rischio (APAT, 2008), effettuare una stima del rischio per la salute in termini di effetti cancerogeni e tossici non cancerogeni.

Nel primo caso, il rischio cancerogeno per l'*i*-esimo contaminante e per il *j*-esimo percorso di esposizione ($R_{C,i,j}$) è definito come segue:

$$R_{C,i,j} = SF_i \cdot EM_j \cdot C_i$$

dove:

- SF_i è il cosiddetto *slope factor*, ossia il rischio incrementale di cancro riferito ad una dose unitaria dell'*i*-esima sostanza cancerogena assunta per tutta la vita;
- EM_j è la portata di esposizione (unità di misura diverse a seconda del percorso considerato), ossia la quantità di matrice contaminata che penetra nell'organismo per massa corporea nell'unità di tempo attraverso il *j*-esimo percorso di esposizione;
- C_i è la concentrazione dell'*i*-esimo contaminante nella matrice considerata (unità di misura diverse a seconda della matrice).

Il rischio cancerogeno complessivo del singolo contaminante ($R_{C,i}$) si ottiene sommando i contributi $R_{C,i,j}$ lungo ciascun percorso di esposizione considerato. Il rischio cancerogeno cumulato (RC) si ottiene invece sommando i rischi complessivi di tutti i contaminanti. Secondo il D.Lgs. 4/2008, il valore di $R_{C,i}$ non deve eccedere il valore di 10^{-6} , mentre il valore di RC non deve superare il valore di 10^{-5} . Si sottolinea, tuttavia, che, nel caso del bando di gara per il

termovalorizzatore di Ischia Podetti del 2009, andato deserto, venne richiesto il rispetto di un valore di RC pari a 10^{-7} .

Nel caso della valutazione degli impatti tossici non cancerogeni, il livello di rischio si definisce tramite il cosiddetto *Hazard Index* (HI), ovvero il rapporto tra la dose di contaminante assunta e una dose di riferimento al di sotto della quale non si osservano effetti negativi sulla salute nell'arco della vita, in seguito a esposizione continuativa dell'individuo. Per l' i -esimo contaminante e il j -esimo percorso di esposizione, l'*Hazard Index* è definito come segue:

$$HI_{i,j} = \frac{EM_j \cdot C_i}{RfD_i}$$

dove RfD_i è la dose di riferimento per l' i -esimo contaminante, intesa come la dose al di sotto della quale la sostanza non induce apprezzabili effetti negativi sull'organismo umano nel lungo periodo.

L'*Hazard Index* complessivo di ciascun contaminante si ottiene sommando i contributi lungo ciascun percorso di esposizione, considerando le concentrazioni/deposizioni in prossimità del punto di massima ricaduta delle emissioni dall'impianto. In base al D.Lgs. 4/2008, l' HI_i di ciascun contaminante non deve eccedere il valore di 1.

Si fa presente che, a differenza degli inquinanti non cancerogeni, per i quali vale il confronto con la RfD_i , il rischio indotto dall'esposizione ad inquinanti cancerogeni non è mai nullo. Vi è sempre infatti la probabilità che la sostanza cancerogena, pur in concentrazioni relativamente basse, possa arrecare un danno permanente al materiale genetico delle cellule e trasformarsi nel tempo in una patologia tumorale. Nel caso di rischio cancerogeno, si considera infatti un livello di rischio accettabile quale riferimento normativo (D.Lgs. 4/2008), ossia i valori di 10^{-6} per il rischio cancerogeno indotto dal singolo inquinante e 10^{-5} per il rischio cancerogeno cumulato.

Stima quantitativa del potenziale rischio connesso al Cr VI

Al fine di cogliere l'entità della problematica connessa alla definizione dei valori limite per la concentrazione al camino dei metalli pesanti emessi da impianti di trattamento termico dei rifiuti, si propone il risultato di un lavoro recentemente pubblicato (Rada et al., 2021), basato su un caso di studio reale. Lo studio fa riferimento ad una proposta di impianto di termovalorizzazione situato in contesto vallivo, caratterizzato dalla presenza di centri abitati e aree agricole a prevalenza di vigneti e meleti. L'impianto in questione emette fumi con una portata di $100.000 \text{ Nm}^3/\text{ora}$ e caratterizzati dai valori garantiti di concentrazione di metalli pesanti riportati in Tabella 6. Per questo impianto di riferimento, è stata effettuata un'analisi di rischio che ha permesso di stimare i valori di R_c e HI_i indotti sulla popolazione locale.

Poiché la normativa non impone valori limite per i singoli metalli pesanti (ad eccezione del mercurio), si sono considerate le frazioni massiche ricavate dalla speciazione effettuata su impianti di incenerimento dei rifiuti da parte di ARPA Emilia-Romagna, grazie alla quale si sono stimati i corrispondenti valori garantiti per i singoli metalli (ARPA Emilia-Romagna, 2011).

Come si osserva, il cromo totale risulta il contaminante più abbondante all'interno del più vasto gruppo di metalli pesanti considerati dalla normativa. Tuttavia, questa non distingue tra Cr III e Cr VI, quest'ultimo caratterizzato da un'elevata tossicità cancerogena rispetto agli altri metalli pesanti. Dal punto di vista del rischio per la salute, si rivelerebbe necessaria una speciazione del cromo totale per valutare il rischio associato nell'area di influenza di un tale impianto. In assenza di specifiche prescrizioni sul Cr VI, in una prima fase di questo esempio

numerico, in via estremamente cautelativa, si considera che il cromo totale sia composto interamente da Cr VI.

Con riferimento al caso di esempio, si è svolta pertanto l'analisi di rischio, sulla base dei risultati della modellazione di dispersione, che ha consentito di stimare il rischio specifico per singolo metallo pesante e il rischio cumulato per tutti i contaminanti considerati. I risultati sono riportati in Tabella 7.

Tabella 6. Frazioni massiche relative agli inquinanti atmosferici tossici e persistenti normati dal D.Lgs. 152/2006 (aggiornamento al 2014) e concentrazioni al camino dei singoli metalli pesanti stimati sulla base dei valori garantiti cumulativi riferiti ad un caso di studio (ARPA Emilia-Romagna, 2011; Rada et al., 2021).

Contaminante	Frazione massica al camino [-]	Valori garantiti di concentrazione al camino (per gruppo) [mg/Nm ³]	Valori garantiti di concentrazione al camino (derivati per singolo metallo pesante) [mg/Nm ³]	
Cadmio	0,907	0,025	0,022675	
Tallio	0,093		0,002325	
Mercurio	-	0,025	0,025	
Antimonio	0,109	0,25	0,02725	
Arsenico	0,003		0,00075	
Cromo (totale)	0,684		0,171	
Cobalto	0,003		0,00075	
Piombo	0,075		0,01875	
Manganese	0,058		0,0145	
Nichel	0,034		0,0085	
Vanadio	0,034		0,0085	
IPA	-		0,01	0,01
PCDD/F	-		2,50E-08	2,50E-08
dl-PCB	-	1,00E-07	1,00E-07	

Tabella 7. Valori stimati della massima concentrazione media annua in aria ambiente a livello del suolo, della massima deposizione atmosferica media annua e rispettivi valori di $R_{c,i}$ e HI_i per gli inquinanti tossici persistenti regolati dalla normativa (Rada et al., 2021).

Contaminante	Massima concentrazione media annua in aria ambiente [mg/m ³]	Massima deposizione media annua [mg m ⁻² anno ⁻¹]	$R_{c,i}$	HI_i
Antimonio	2,20E-08	7,16E-10	0,00E+00	4,54E-04
Arsenico	6,04E-10	1,97E-11	2,17E-10	1,87E-04
Cadmio	1,83E-08	5,96E-10	2,23E-08	6,87E-03
Cromo (totale)	1,38E-07	4,49E-09	8,62E-06	5,70E-03
Cobalto	6,04E-10	1,97E-11	0,00E+00	4,68E-04
Piombo	1,51E-08	4,93E-10	0,00E+00	5,10E-06
Manganese	1,17E-08	3,81E-10	0,00E+00	9,58E-04
Mercurio	2,01E-08	6,57E-10	0,00E+00	2,52E-04
Nichel	6,85E-09	2,23E-10	1,31E-09	3,12E-04
Tallio	1,87E-09	6,11E-11	0,00E+00	2,01E-04
Vanadio	6,85E-09	2,23E-10	0,00E+00	2,81E-04
IPA	8,06E-09	2,63E-10	1,09E-08	1,02E-05
PCDD/F	2,01E-14	6,57E-16	5,18E-10	1,89E-06
dl-PCB	8,06E-14	2,63E-15	2,07E-10	7,59E-07
		TOTALE	8,66E-06	

Disponendo dei risultati di una modellazione di dispersione su un impianto di termovalorizzazione di rifiuti urbani, è possibile stimare in prima approssimazione le massime ricadute attese da un impianto simile situato in un'area che presenti caratteristiche morfologiche e meteo-climatiche paragonabili con quelle del caso di riferimento. Ciò è possibile attraverso l'impiego del cosiddetto "fattore di diluizione", che rappresenta il rapporto tra la massima concentrazione media annua a livello del suolo o il massimo valore medio annuo di deposizione atmosferica di un contaminante (o di un gruppo di contaminanti) ed il rispettivo flusso di massa al camino. In questo modo, l'applicazione del fattore di diluizione per un dato inquinante (o per un gruppo di inquinanti) al rispettivo flusso di massa in uscita da un impianto simile, di cui si vuole stimare l'impatto, consente di valutare le massime concentrazioni e deposizioni medie annue indotte da questo. Nel caso specifico, i fattori di diluizione ricavati dal caso di riferimento vengono qui applicati ai singoli metalli pesanti, al fine di stimare gli impatti dell'impianto al variare della concentrazione di Cr VI, che potenzialmente può contribuire più di tutti i metalli pesanti al rischio cancerogeno.

L'approssimazione che vede il cromo totale interamente composto da Cr VI comporta un valore di R_c che, seppur compatibile con il valore considerato accettabile di 10^{-5} (D.Lgs. 4/2008), risulta quasi due ordini di grandezza superiore al valore indicato nel già citato bando di gara del 2009, contribuendo, nel caso preso ad esempio, al 99,5% del rischio cancerogeno cumulato. Si tratta certamente di un'ipotesi estremamente cautelativa, che richiede di prendere in considerazione anche altri scenari più realistici.

All'interno dello stesso studio citato (Rada et al., 2021), è stata condotta un'analisi di sensibilità per stimare l'influenza del contenuto di Cr VI nel cromo totale sul rischio cancerogeno cumulato indotto dall'impianto considerato a titolo di esempio. Essendo il Cr VI un composto cancerogeno per via inalatoria, in Tabella 8 si riporta il risultato dell'analisi di sensibilità sul rischio cancerogeno inalatorio indotto al variare del contenuto di Cr VI all'interno del parametro cromo totale. Come si può vedere, il Cr VI merita comunque un'attenzione particolare.

Tabella 8. Dipendenza del rischio cancerogeno cumulato per via inalatoria dal contributo del Cr VI alla concentrazione al camino di cromo totale.

Contenuto di Cr VI nel cromo totale [%]	R_c inalatorio [-]	Contributo del Cr VI all' R_c inalatorio [%]
0	3,11E-08	0,00
10	8,93E-07	96,52
20	1,76E-06	98,23
30	2,62E-06	98,81
40	3,48E-06	99,11
50	4,34E-06	99,28
60	5,21E-06	99,32
70	6,07E-06	99,49
80	6,93E-06	99,55
90	7,79E-06	99,60
100	8,65E-06	99,64

4.1.3. PCDD/F e dl-PCB

Benché le emissioni di PCDD/F e dl-PCB dal settore dei trattamenti termici dei rifiuti si siano ridotte negli ultimi decenni, grazie all'introduzione delle BAT di settore e all'imposizione di limiti di concentrazione al camino più restrittivi, tali inquinanti richiedono comunque attenzione. Se da un lato contaminanti come il Cr VI rivestono particolare importanza dal punto di vista del

rischio cancerogeno per via inalatoria, PCDD/F e dl-PCB tendono ad accumularsi nei grassi animali e vegetali, comportando rischi dal punto di vista della contaminazione della catena alimentare. I percorsi tipici degli inquinanti atmosferici di interesse per la catena alimentare comprendono inizialmente la deposizione al suolo o sulla superficie di colture destinate all'alimentazione umana o colture foraggere. Il trasferimento all'interno dell'organismo umano può avvenire tramite il consumo diretto delle colture contaminate o tramite il consumo di pesci o carni di animali esposti alla contaminazione per via inalatoria, tramite la dieta o l'ingestione di suolo contaminato. Un ulteriore contributo può giungere dal consumo di alimenti derivati, quali uova o prodotti caseari (Schiavon et al., 2013, 2016).

Nell'ultimo decennio, la tematica è stata sviluppata dal Gruppo di ricerca in Ingegneria Sanitaria-Ambientale del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università degli Studi di Trento ed ha portato a definire nuovi strumenti per affrontare il potenziale problema legato alle emissioni di PCDD/F e dl-PCB, non solo dal settore rifiuti, ma anche da altri settori che possono svolgere un ruolo chiave nell'emissione di queste sostanze, quali la produzione di acciaio e la combustione di biomasse.

In particolare, si segnala una metodologia per il controllo della dose di diossina calibrata sulla dieta di una popolazione *target*, basata sulla definizione di un valore massimo tollerabile di deposizione di diossina al suolo specifico per l'area oggetto di studio (Schiavon et al., 2013). Si segnalano, inoltre, le potenzialità del monitoraggio della deposizione al suolo di diossina, che è in grado di fornire diverse tipologie di informazioni utili al controllo di questa famiglia di composti: innanzitutto, il monitoraggio continuo in punti individuati dall'applicazione di modelli di dispersione, consente di valutare il rispetto del valore guida "locale" di deposizione al suolo nelle aree di incidenza di sorgenti di emissione di tali composti; inoltre, il confronto tra i profili dei congeneri di PCDD/F e dl-PCB rilevati al camino di sorgenti note e nelle deposizioni al suolo consente di individuare le attività responsabili dei livelli di tali inquinanti nei punti di monitoraggio (Rada et al., 2014); analoghe finalità si raggiungono con la caratterizzazione dei sedimenti di corpi d'acqua a debole ricambio (stagni e laghi) che, oltre a fornire indicazioni sui contributi da diverse attività, consentono anche di ricostruire l'andamento storico delle deposizioni nel punto di campionamento (Argiriadis et al., 2014).

4.1.4. Proposte di integrazione alla normativa in vigore

4.1.4.1. Metalli pesanti

Allo stato attuale, la letteratura scientifica risulta carente di studi sulla speciazione del cromo nelle emissioni dal settore rifiuti. L'Agenzia per l'Ambiente del Regno Unito ha stimato in 1,41% il massimo contenuto di Cr VI nel cromo totale al camino di impianti di incenerimento di rifiuti (UK Environment Agency, 2017). Un altro studio (Świetlik et al., 2014) ha stimato valori più elevati, compresi tra 6,5% e 12,7%. Diverrebbe quindi importante introdurre un valore limite dedicato almeno al cromo totale, accoppiato ad un controllo periodico sulla concentrazione di Cr VI al camino in impianti di trattamento termico dei rifiuti.

Sulla base del valore più elevato individuato finora da Świetlik et al. (2014), in via cautelativa si può assumere un contenuto di Cr VI pari al 20%. Pertanto, durante il percorso autorizzativo di un eventuale nuovo impianto, si suggerisce la seguente procedura:

- calcolare la concentrazione di Cr VI che fornisce il valore accettabile di R_c (o un valore più restrittivo eventualmente riportato all'interno del bando di gara);

- calcolare la concentrazione di cromo totale corrispondente, dividendo la concentrazione di Cr VI calcolata al punto precedente per un coefficiente 0,20 che deriva da una prima ipotesi, cautelativa, che consideri un contenuto di Cr VI nel cromo totale del 20%;
- adottare la concentrazione di cromo totale calcolata al punto precedente come valore garantito di concentrazione al camino per la procedura di autorizzazione dell'impianto;
- prevedere sanzioni in caso di mancato rispetto del valore garantito della concentrazione al camino di cromo totale.

Si tratterebbe di un approccio facilmente implementabile, in quanto il monitoraggio del cromo totale fa già parte dei sistemi di monitoraggio convenzionali al camino. Si propone, tuttavia, un secondo approccio restrittivo, che richiederebbe uno sforzo maggiore dal punto di vista analitico, in quanto basato sulla speciazione del cromo totale:

- calcolare la concentrazione di Cr VI che fornisce il valore accettabile di R_c (o un valore più restrittivo eventualmente riportato all'interno del bando di gara);
- stabilire una frequenza per l'analisi del Cr VI al camino;
- adottare il valore di concentrazione di Cr VI calcolato al primo punto come valore garantito di concentrazione al camino per la eventuale procedura di autorizzazione di un impianto;
- prevedere sanzioni in caso di mancato rispetto del valore garantito della concentrazione al camino di Cr VI.

Benché più complesso dal punto di vista analitico rispetto al cromo totale, il monitoraggio del Cr VI può essere svolto attraverso spettrometria di emissione atomica (ICP-AES) seguita da cromatografia ionica (US EPA, 1996a; US EPA, 1996b; Shah et al., 2012; Miyake et al., 2017).

Le procedure proposte sin qui potrebbero rappresentare un transitorio verso un passaggio ulteriore, ossia la prescrizione di un valore limite per il solo Cr VI. A tal proposito, vale la pena ricordare che, nel 2009, lo Studio di Fattibilità relativo alla progettazione, realizzazione e gestione di un impianto di trattamento termico da localizzarsi in località Ischia Podetti, promosso dalla PAT, ha proposto l'adozione di un valore limite di concentrazione al camino specifico per il Cr VI pari a $1 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ su media annua, scelto in base a considerazioni sul valore da garantire per il cadmio ($25 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$) e sui potenziali cancerogeni dei due contaminanti. Lo stesso documento ha proposto di considerare il Cr VI nell'analisi di rischio relativa ad un nuovo impianto, sottolineando che, pur non essendo un inquinante normalmente rilevante per il settore dei rifiuti urbani, il Cr VI deve essere tenuto sotto controllo in virtù della sua elevata cancerogenicità (superiore a quella del cadmio).

In aggiunta al Cr VI, lo Studio di Fattibilità ha proposto di considerare per l'analisi di rischio anche altri metalli (cadmio, nichel e arsenico) e il benzo[a]pirene, oltre a PCDD/F e PCB, già di norma valutati nelle analisi di rischio. Sulla base della cancerogenicità dei suddetti contaminanti, il Terzo Aggiornamento del Piano Provinciale di Smaltimento dei Rifiuti di Trento (Provincia Autonoma di Trento, 2006), ripreso dallo Studio di Fattibilità citato, ha stabilito che un tale impianto debba garantire un rischio per la salute dei cittadini sempre inferiore a 10^{-7} . Poiché le considerazioni espresse sul Cr VI dallo Studio di Fattibilità del 2009 fanno riferimento al caso specifico di Ischia Podetti, qualora si considerassero altri siti (o diverse modalità di rilascio per lo stesso sito), il valore da garantire al camino per tale contaminante deve essere

aggiornato sulla base del rispetto del rischio cancerogeno massimo di 10^{-7} per i siti considerati. Gli impatti a livello del suolo, infatti, oltre che dalle caratteristiche delle sorgenti di emissione, dipendono fortemente anche dalle condizioni meteo-climatiche specifiche e dall'orografia dell'area. Tuttavia, occorre tenere presente i limiti delle metodologie analitiche attuali per valutare concentrazioni relativamente di microinquinanti: nel corso del monitoraggio condotto nel 2009 su campioni di polveri totali in aria ambiente, i cui risultati sono riportati all'interno del suddetto Studio di Fattibilità, il limite di rilevabilità del Cr VI era pari a 2 ng/m^3 . Applicando le formulazioni per la stima del rischio cancerogeno per via inalatoria (US EPA, 2005, 2011, 2017), per rispettare il valore di rischio cancerogeno di 10^{-7} , con riferimento al solo contributo del Cr VI, la concentrazione in aria ambiente di quest'ultimo dovrebbe risultare $< 3,4 \text{ pg/m}^3$, ossia tre ordini di grandezza inferiori al limite di rilevabilità. Pertanto, non sarebbe possibile misurare l'effettivo rispetto del valore di rischio cancerogeno di 10^{-7} tramite monitoraggi sul territorio. Ci si dovrebbe perciò basare solo sulla modellazione di dispersione che quindi richiede una particolare attenzione nella produzione/disponibilità di dati locali per la caratterizzazione della meteorologia della zona di un eventuale impianto.

Per garantire il rispetto di uno specifico valore limite al camino per il Cr VI, per gli impianti di trattamento termico dei rifiuti potrebbe rendersi necessaria l'adozione di controllo delle emissioni più efficienti, ad esempio tramite upgrading delle tecnologie normalmente impiegate (a secco o ad umido). Data l'elevata solubilità del Cr VI, l'adozione di tecnologie ad umido sembra preferibile (es.: torri di lavaggio ad acqua, scrubber Venturi o scrubber-cicloni). Il successivo trattamento dei reflui liquidi generati da tali tecnologie può essere effettuato tramite tecniche sviluppate di recente per la rimozione del Cr VI da soluzioni acquose o da acque reflue, basate sull'adsorbimento (Huang et al., 2017; Yao et al., 2020), la catalisi (Bano et al., 2020; Wang et al., 2020) e processi biologici (Pradhan et al., 2017). Per questioni gestionali, la tendenza del settore è quella di preferire soluzioni a secco, per cui, nell'ipotesi di lasciare aperta tale opzione è importante introdurre un controllo dei valori emissivi come discusso sopra.

Verificato il ruolo del Cr VI e valutata l'introduzione di un valore limite di concentrazione al camino per questa sostanza, si ritiene auspicabile anche l'introduzione di un valore limite specifico per il cadmio, il cui ruolo è stato evidenziato all'interno dello Studio di Impatto Ambientale relativo al progetto del termovalorizzatore di Trento (2002). È auspicabile, inoltre, un adeguamento generale dei valori limite di concentrazione ai miglioramenti tecnologici raggiunti nel settore in termini di controllo delle emissioni.

4.1.4.2. PCDD/F e dl-PCB

Per quanto riguarda i due gruppi di inquinanti organici tossici e persistenti potenzialmente più impattanti, si propongono:

- il monitoraggio in continuo di PCDD/F al camino, come proposto nello Studio di Fattibilità per l'impianto di trattamento termico dei rifiuti in località Ischia Podetti (2009);
- il monitoraggio sistematico delle deposizioni atmosferiche di PCDD/F e dl-PCB, quale strumento di controllo dell'esposizione della popolazione.

Il monitoraggio periodico al camino come previsto dalla normativa, infatti, potrebbe non rivelarsi esaustivo per spiegare i potenziali impatti sul territorio. Il monitoraggio delle deposizioni atmosferiche, ad integrazione del monitoraggio in continuo al camino, dovrebbe essere svolto in prossimità di luoghi sensibili e nei punti di massima ricaduta di un eventuale impianto in aree

agricole e in presenza di allevamenti. Quale valore di controllo, si suggerisce di utilizzare un valore di deposizione di PCDD/F pari a $1,91 \text{ pg}_{\text{TEQ}} \text{ m}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$, stimato come tollerabile per il Trentino (Schiavon et al., 2013). Un sistema di monitoraggio basato su questo approccio consentirebbe di ricavare informazioni più compatibili con le caratteristiche e le modalità di rilascio di questi composti, che, ad eccezione di incidenti, sono prevalentemente responsabili di effetti cronici in seguito ad esposizioni di lungo periodo.

4.2. Considerazioni sul percorso autorizzativo

4.2.1. Finalità

La Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) dei progetti è regolamentata a livello nazionale dal D. Lgs. 152/2006 e s.m.i. e disciplinata per la Provincia di Trento dalla seguente normativa specifica:

- Legge Provinciale 17 settembre 2013 n. 19 "Disciplina provinciale della valutazione dell'impatto ambientale. Modificazioni della legislazione in materia di ambiente e territorio e della Legge Provinciale 15 maggio 2013 n. 9 [...]";
- Decreto del Presidente della Provincia 20 luglio 2015, n. 9-23/Leg;
- Legge provinciale n. 6 del 19 settembre 2019 di modifica della L.P. 19/2013 con introduzione del provvedimento autorizzatorio unico provinciale (PAUP)

Il procedimento di VIA ha la finalità di valutare se il progetto determina potenziali impatti ambientali significativi e negativi e, a seconda della complessità e di specifiche soglie dimensionali, segue procedure diverse. In particolare, per nuovi progetti:

- verifica di assoggettabilità (*screening*);
- consultazione preliminare volta a definire i contenuti dello studio di impatto ambientale e del progetto definitivo (*scoping*);
- valutazione dell'impatto ambientale (VIA);

4.2.2. Le tipologie progettuali e le soglie dimensionali

La L.P. n. 19/2013 e s.m. non individua direttamente le tipologie progettuali dei progetti da assoggettare alle procedure di VIA, ma fa riferimento agli allegati III e IV alla parte II del D. Lgs. 152/2006". In particolare:

- l'allegato III del D. Lgs. n. 152/2006 individua l'elenco dei progetti di competenza delle regioni e delle province autonome di Trento e di Bolzano che sono soggette direttamente a procedura di VIA.

Per quanto concerne la possibilità di un procedimento di VIA nel caso di impianto di smaltimento e recupero di rifiuti non pericolosi, si fa riferimento ai seguenti commi dell'allegato III del D. Lgs. 152/2006 e s.m.:

n) Impianto di smaltimento e recupero di rifiuti non pericolosi, con capacità superiore a 100 t/giorno, mediante operazioni di incenerimento o di trattamento di cui all'allegato B, lettere D9, D10 e D11, ed allegato C, lettera R1, della parte quarta del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152.

o) Impianti di smaltimento dei rifiuti non pericolosi mediante operazioni di raggruppamento o ricondizionamento preliminari e deposito preliminare, con capacità superiore a 200 t/giorno (operazioni di cui all'allegato B, lettere D13 e D14, della parte quarta del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152).

q) Impianti di smaltimento di rifiuti non pericolosi mediante operazioni di deposito preliminare, con capacità superiore a 150.000 m³ oppure con capacità superiore a 200 t/giorno (operazioni di cui all'allegato B, lettera D15, della parte quarta del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152).

- L'allegato IV del D. Lgs. n. 152/2006 individua l'elenco dei progetti sottoposti a verifica di assoggettabilità (screening) di competenza delle regioni e delle province autonome di Trento e di Bolzano. Tale elenco è suddiviso in 8 macrotipologie, all'interno delle quali sono state poi inserite le varie tipologie progettuali:

1. *agricoltura;*
2. *industria energetica ed estrattiva;*
3. *lavorazione dei metalli e dei prodotti minerali;*
4. *industria dei prodotti alimentari;*
5. *industria dei tessuti, del cuoio, del legno e della carta;*
6. *industria della gomma e delle materie plastiche;*
7. *progetti di infrastrutture;*
8. *altri progetti.*

Per quanto concerne la possibilità di un procedimento di verifica di assoggettabilità a VIA nel caso di impianto di smaltimento e recupero di rifiuti non pericolosi, si fa riferimento ai seguenti commi del punto 7 (progetti di infrastrutture) dell'allegato IV del D. Lgs. 152/2006 e s.m.:

r) impianti di smaltimento di rifiuti urbani non pericolosi, mediante operazioni di incenerimento o di trattamento, con capacità complessiva superiore a 10 t/giorno (operazioni di cui all'allegato B, lettere D2 e da D8 a D11, della parte quarta del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152); impianti di smaltimento di rifiuti non pericolosi, mediante operazioni di raggruppamento o di ricondizionamento preliminari, con capacità massima complessiva superiore a 20 t/giorno (operazioni di cui all'allegato B, lettere D13 e D14 del decreto legislativo 152/2006);

s) impianti di smaltimento di rifiuti speciali non pericolosi, con capacità complessiva superiore a 10 t/giorno, mediante operazioni di incenerimento o di trattamento (operazioni di cui all'allegato B, lettere D2 e da D8 a D11, della parte quarta del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152);

t) impianti di smaltimento di rifiuti speciali non pericolosi mediante operazioni di deposito preliminare con capacità massima superiore a 30.000 m³ oppure con capacità superiore a 40 t/giorno (operazioni di cui all'allegato B, lettera D15 della parte quarta del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152);

z.b) Impianti di smaltimento e recupero di rifiuti non pericolosi, con capacità complessiva superiore a 10 t/giorno, mediante operazioni di cui all'allegato C, lettere da R1 a R9, della parte quarta del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, ad esclusione degli impianti mobili volti al recupero di rifiuti non pericolosi provenienti dalle operazioni di costruzione e demolizione, qualora la campagna di attività abbia una durata inferiore a novanta giorni, e degli altri impianti mobili di trattamento dei rifiuti non pericolosi, qualora la campagna di attività abbia una durata inferiore a trenta giorni. Le eventuali successive campagne di attività sul medesimo sito sono sottoposte alla procedura di verifica di assoggettabilità a VIA qualora le quantità siano superiori a 1.000 m³ al giorno¹.

Sono sottoposti alla procedura di verifica di assoggettabilità a VIA di competenza nazionale:

- i progetti elencati nell'allegato II-bis alla Parte Seconda del D. Lgs.152/2006;
- i progetti elencati nell'allegato II alla Parte Seconda del D. Lgs.152/2006, che servono esclusivamente o essenzialmente per lo sviluppo ed il collaudo di nuovi metodi o prodotti e non sono utilizzati per più di due anni;
- le modifiche o le estensioni dei progetti elencati negli allegati II o II-bis, alla parte seconda del D. Lgs.152/2006, la cui realizzazione può generare potenziali impatti ambientali significativi e negativi, ad eccezione delle modifiche o estensioni che risultino conformi agli eventuali valori limite stabiliti nell'allegato II.

4.2.3. Fasi della procedura

4.2.3.1. Verifica di assoggettabilità (screening)

Il procedimento di verifica di assoggettabilità è attivato allo scopo di valutare se un progetto può avere un impatto significativo e negativo sull'ambiente e se pertanto dev'essere assoggettato al procedimento di VIA. La procedura di verifica di assoggettabilità si applica ai seguenti casi:

- nel caso di nuovi progetti di opere, impianti o interventi, le cui dimensioni superano quelle fissate dall'allegato IV della parte II del d. lgs. n. 152/2006;
- per progetti di modifica o ampliamento di opere, impianti o interventi che presentano soglie dimensionali al di sotto di quelle indicate dall'allegato IV della parte II del d. lgs. n. 152/2006 nel rispetto dei criteri definiti dal d.m. n. 52/2015;
- nel caso di progetti di modifica o ampliamento sostanziali di opere, impianti o interventi già autorizzati o realizzati o in fase di realizzazione indipendentemente dalle soglie dimensionali previste dall'allegato III e IV della parte II del d. lgs. n. 152/2006, accertata dal Servizio la significatività dell'impatto.

Nel caso in cui le opere dovessero ricadere, anche parzialmente, all'interno di aree geografiche sensibili, le soglie dimensionali previste dall'allegato IV sono ridotte del 50%.

Il Servizio Autorizzazioni e Valutazioni Ambientali, entro sette giorni dal deposito, accerta la completezza della documentazione, e se risulta incompleta o carente chiede al proponente

¹ lettera così modificata dall'art. 35, comma 1. lettera l-bis), della legge n. 108 del 2021.

le opportune integrazioni documentali fissando il termine per la presentazione. Decorso inutilmente il termine assegnato non avvia il procedimento e né da comunicazione al proponente.

Chiunque può prendere visione della documentazione, ed entro il termine di 45 giorni dalla data di pubblicazione all'Albo elettronico della Provincia, è possibile presentare osservazioni. Qualora ritenuta opportuna, in relazione a valutazioni o verifiche di particolare complessità, il Servizio può indire una conferenza di servizi per l'esame istruttorio del progetto sottoposto a procedura di verifica.

Il Servizio, sulla base dei contenuti della richiesta, delle osservazioni del pubblico, dei pareri espressi anche in conferenza di servizi e delle valutazioni tecniche sulla base dei criteri di selezione di cui all'allegato A della legge provinciale si pronuncia in merito alla sottoposizione o meno del progetto alla procedura di VIA entro 25 giorni dalla scadenza dei termini per presentare osservazioni.

Il Servizio comunica il contenuto integrale della decisione al proponente e ai soggetti tenuti al controllo degli adempimenti ed al monitoraggio ambientale e ne cura la pubblicazione integralmente all'Albo elettronico della Provincia e per estratto nel Bollettino ufficiale della Regione.

4.2.3.2. Valutazione di Impatto Ambientale (VIA)

La procedura di Valutazione di Impatto Ambientale comprende, nel provvedimento positivo di valutazione dell'impatto ambientale adottato dalla Giunta provinciale, tutte le autorizzazioni e pareri per la sua realizzazione.

L'istruttoria di VIA prevede il coinvolgimento delle varie strutture (Servizi ed Agenzie) della Provincia di Trento alle quali viene richiesto un parere di merito sulle opere, nonché il coinvolgimento degli Enti locali competenti per territorio. Un elenco completo delle strutture si può trovare presso il sito web dell'Agenzia Provinciale per la Protezione dell'Ambiente².

L'istruttoria prevede una fase obbligatoria di partecipazione pubblica. L'avviso di deposito del progetto su un quotidiano locale e la pubblicazione sull'Albo elettronico della Provincia di Trento determinano l'avvio della fase di partecipazione.

La normativa vigente prevede che chiunque possa accedere e visionare la documentazione depositata. Allo scopo di facilitare la consultazione è possibile fare riferimento alla sintesi non tecnica. Essa rappresenta il documento di accompagnamento del progetto e dello studio di impatto ambientale finalizzato a raccogliere e sintetizzare le informazioni presenti nello studio con linguaggio non tecnico.

4.2.4. Tempi della procedura

Le procedure di Verifica di Assoggettabilità (*screening*), di consultazione preliminare (*scoping*) e di VIA hanno tempi definiti per legge o da specifiche deliberazioni della Giunta provinciale. In particolare, le procedure devono essere concluse entro i seguenti tempi massimi:

- verifica di assoggettabilità (*screening*): entro 70 giorni dal deposito;
- consultazione preliminare (*scoping*): entro 60 giorni dal deposito;

² http://www.valutazioneambientale.provincia.tn.it/valutazioni_ambientali/VIA/-VIA/pagina50.html

- VIA: entro 140 giorni dal deposito della domanda e contestuale pubblicazione su un giornale e sul sito internet provinciale;

Le tempistiche sopra indicate sono relative ai tempi massimi di conclusione dei procedimenti, in assenza di sospensioni volte a integrare la documentazione depositata.

4.2.5. Approfondimenti su impianti di combustione dei rifiuti

Nel caso non si ricorresse alla valorizzazione ex situ del rifiuto tramite produzione di syngas ed eventuali altri prodotti (es., idrogeno, etanolo, metanolo), le alternative impiantistiche consisterebbero in:

- un impianto a combustione diretta dei rifiuti;
- un impianto di gassificazione dei rifiuti e combustione in loco del syngas a fini energetici.

In questi casi, l'impianto darebbe sicuramente luogo ad emissioni in atmosfera e risulterebbe soggetto ai valori limite di concentrazione al camino riportati all'interno del D.Lgs. 152/2006 per l'incenerimento di rifiuti, opportunamente ridotti in fase di autorizzazione. Trattandosi di processi di combustione, le portate di gas esausto in uscita dal camino risulterebbero nell'ordine di 10^4 – 10^5 Nm³/ora. Ad esempio, lo Studio di Fattibilità per il termovalorizzatore di Trento (2009), a fronte di una portata di rifiuti da trattare di 103.000 t/anno, ha considerato una portata dei fumi di 109.000 Nm³/ora. Mantenendo questa proporzione tra portata di rifiuti in ingresso e portata dei fumi e considerando le medesime ore di funzionamento assunte nello Studio di Fattibilità (7.800 ore/anno), un impianto di combustione diretta dei rifiuti dimensionato sulla base dei quantitativi di rifiuti definiti dagli Scenari 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 produrrebbe una portata dei fumi rispettivamente di 65.700, 61.300, 41.900 e 39.200 Nm³/ora. Adottando, a titolo di esempio, i valori di concentrazione da garantire al camino riportati nello Studio di Fattibilità per il termovalorizzatore di Trento (2009), a seconda della taglia dell'impianto, si stimano i flussi di massa al camino massimi riportati in Tabella 9.

È bene notare che i valori qui presentati devono intendersi a puro titolo indicativo, in quanto ogni impianto ha caratteristiche proprie. Le emissioni massime stimate, inoltre, potrebbero differire da quelle qui riportate nel caso di combustione indiretta (gassificazione del rifiuto e combustione in loco del syngas). Per quest'ultimo caso, infatti, ci si attende un miglioramento per quanto riguarda i valori di concentrazione al camino di alcune sostanze. L'impiego di un gas combustibile, anziché di un combustibile solido eterogeneo, permette di ottenere un processo di combustione più omogeneo ed efficiente. Trattandosi tuttavia sempre di un processo di combustione, le portate in gioco e, di conseguenza, i flussi emissivi di inquinanti atmosferici, sebbene inferiori per alcuni parametri, risultano, in genere, paragonabili (come ordine di grandezza) a quelli di un processo di combustione diretta dei rifiuti. Per una più verosimile caratterizzazione delle emissioni, è opportuno fare riferimento alle specifiche tecnologie e ai singoli produttori. Nella stessa Tabella 9 si riporta un confronto con l'inventario delle emissioni provinciali, relativo al 2015 (Provincia Autonoma di Trento, 2019). Si può osservare come, nel caso di ossidi di zolfo, ossidi di azoto e ammoniacale, i flussi massimi stimati dagli impianti relativi agli scenari considerati siano in tutti i casi superiori alle emissioni annue totali a livello provinciale. Il confronto tuttavia è solo parziale, in quanto solo una minima parte delle sostanze considerate in Tabella 9 è effettivamente conteggiata dagli inventari delle emissioni regionali e provinciali.



Tabella 9. Flussi di massa al camino stimati dallo Studio di Fattibilità relativo all'impianto di trattamento termico dei rifiuti in località Ischia Podetti e stima dei flussi per un impianto equivalente di combustione diretta che riceva in ingresso il quantitativo di rifiuti definito dagli Scenari 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4.

Sostanza	Concentrazione garantita al camino [mgNm ³]	Flusso di massa stimato [t/anno]**					Emissioni a livello provinciale
		Termovalorizzatore di Trento (SIA 2002)	Scenario 3.1	Scenario 3.2	Scenario 3.3	Scenario 3.4	
Polveri sospese totali	1,5	1.275	769	718	490	459	3.156,72
Carbonio organico totale	10	8.502	5.127	4.784	3.265	3.058	41.886,91
Composti inorganici del cloro	2	1.700	1.025	957	653	612	n.d.
Composti inorganici del fluoro	0,25	213	128	120	82	76	n.d.
Ossidi di zolfo	10	8.502	5.127	4.784	3.265	3.058	461,94***
Ossidi di azoto	40	34.008	20.506	19.137	13.062	12.232	7.567,64
Monossido di carbonio	50	42.510	25.633	23.921	16.327	15.290	31.910,14
Ammoniaca	10	8.502	5.127	4.784	3.265	3.058	2.203,57
Mercurio	0,025	21,3	12,82	11,96	8,16	7,65	n.d.
Cadmio e Tallio	0,025	21,3	12,82	11,96	8,16	7,65	n.d.
Altri metalli (eccetto Cr VI)	0,25	213	128,16	119,60	81,63	76,45	n.d.
Diossine e furani*	3,00E-08	2,55E-05	1,54E-05	1,44E-05	9,80E-06	9,17E-06	n.d.
Benzo[a]pirene	1,00E-04	0,09	0,05	0,05	0,03	0,03	n.d.
Cr VI	1,00E-03	0,85	0,51	0,48	0,33	0,31	n.d.

* Massa espressa in TEQ.

** Si è considerato un tenore di ossigeno medio dell'11%.

*** Valore riferito al solo biossido di zolfo.

Se, da un lato, una riduzione della taglia dell'impianto comporta portate dei fumi minori, che si traducono in flussi di massa degli inquinanti proporzionalmente inferiori, dall'altro lato è opportuno porre particolare attenzione alle modalità di rilascio dei fumi. In particolare, la dispersione dei fumi e dei contaminanti rilasciati è influenzata dalle seguenti variabili:

- altezza della quota di rilascio;
- temperatura dei fumi in uscita;
- velocità dei fumi in uscita.

Considerando le medesime condizioni meteorologiche e morfologiche dell'area, maggiori sono i valori delle precedenti variabili, maggiore è il grado di dispersione degli inquinanti atmosferici e minori risultano gli impatti attesi a livello del suolo. Lo Studio di Impatto Ambientale relativo al progetto del termovalorizzatore di Trento (2002) ha evidenziato l'importanza di considerare una quota di rilascio di 100 m, dettata dalla taglia dell'impianto considerata all'epoca. Nonostante l'elevata quota di rilascio ed una velocità di uscita dei fumi prossima a valori che potrebbero richiedere una valutazione di impatto acustico *ad hoc* (20 m/s), la modellazione di dispersione e l'analisi di rischio hanno evidenziato un rischio individuale massimo di $4,4 \cdot 10^{-7}$ per i contributi cumulati di cadmio e PCDD/F attraverso i seguenti percorsi di esposizione: inalazione, contatto dermico, ingestione accidentale di suolo e dieta. Si fa presente che il percorso dieta considerava il solo consumo di mele. Inoltre, l'analisi di rischio valutava esclusivamente i contributi di cadmio e PCDD/F. Considerando la successiva prescrizione emersa all'interno del Terzo Aggiornamento del Piano Provinciale di Smaltimento dei Rifiuti (Provincia Autonoma di Trento, 2006) circa il valore accettabile di rischio cancerogeno per la popolazione (massimo rischio individuale composto da tutti gli inquinanti di interesse), stabilito in 10^{-7} , l'impianto considerato nel 2002 non sarebbe in grado di rispettare tale criterio. Bene quindi che negli anni la raccolta differenziata è aumentata riducendo quindi i flussi attuali di rifiuti di interesse per una valorizzazione energetica. Rispetto al progetto preliminare del 2002, lo Studio di Fattibilità del 2009 introduce tuttavia elementi di novità che consentirebbero di ridurre il rischio indotto sul territorio, a parità di parametri quali la quota di rilascio (100 m, scelta che era dipesa fortemente dal sito e dalle dimensioni dell'impianto), la velocità (20 m/s) e la temperatura dei fumi (140 °C, secondo il progetto preliminare del 2002). Tra questi si segnala la taglia considerata nello Studio di Fattibilità del 2009, che viene ridotta a meno della metà rispetto al 2002, l'aggiornamento dei valori di concentrazione da garantire al camino ai valori riportati in Tabella 9 e l'introduzione di limiti specifici per alcune sostanze. Rimane comunque da valutare se, in seguito all'introduzione di questi criteri aggiuntivi, il rischio di un impianto, una volta definito e potenzialmente localizzato, risulti effettivamente inferiore al valore di 10^{-7} .

L'adozione di taglie di impianti inferiori rispetto a quella considerata nello Studio di Fattibilità del 2009, quali quelle compatibili con gli scenari analizzati nel presente studio, consentirebbe di ridurre ulteriormente gli impatti. Questo non ipotizzando però interventi sulla quota di rilascio. Se si prevedesse di realizzare l'impianto presso Ischia Podetti e si volesse considerare un abbassamento della quota di rilascio, alla luce delle taglie ridotte delle alternative analizzate negli Scenari 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4, occorrerebbe effettuare valutazioni approfondite sulla dispersione degli inquinanti in atmosfera, con un conseguente allungamento dei tempi del percorso autorizzativo. Si precisa che tali valutazioni sarebbero comunque necessarie qualora si consideri una localizzazione diversa da Ischia Podetti, per la quale erano state compiute

attività di monitoraggio e di modellazione approfondite nel 2002 con quota di rilascio a 100 m.

Un'ulteriore opzione per ridurre le ricadute al suolo degli inquinanti potrebbe riguardare la riduzione del recupero termico. Ciò consentirebbe di rilasciare i fumi ad una temperatura più elevata, che favorirebbe l'innalzamento del pennacchio e la dispersione degli inquinanti. Tuttavia, occorre considerare il risvolto negativo legato ad un limitato recupero termico in zona, in quanto l'energia non recuperata dall'impianto continuerebbe ad essere prodotta tramite i vettori energetici attualmente in uso, che includono combustibili di origine fossile. Recentemente (Adami et al., 2020), con riferimento ad ambiti rurali, si è suggerito un approccio alternativo basato sul concetto di riscaldamento elettrico, che potrebbe essere alimentato dall'energia elettrica prodotta da un impianto di conversione energetica dei rifiuti. Tale approccio però richiede interventi strutturali alla rete elettrica che risultano più compatibili con aree rurali e meno densamente abitate rispetto ad aree urbane. Per approfondimenti si rimanda al citato lavoro. Si sottolinea peraltro che un rilascio a temperatura più elevata andrebbe contro il principio di minimizzare gli impatti sul microclima locale.

Si fa presente che la valorizzazione ex situ del syngas con eventuali prodotti derivanti dalla sua trasformazione potrebbe comunque essere associata a rilasci secondari in loco da trattamento del syngas stesso. Ovviamente, nel caso ciò potesse avvenire (in funzione della tecnologia scelta), sarebbe necessario approfondire l'impatto locale di tale scenario. Per approfondimenti, si rimanda al capitolo 5.

4.3. Considerazioni localizzative

4.3.1. Introduzione

Nella presente sezione si riporta, come ragionamento puramente tecnico, un inquadramento preliminare di alcune delle potenziali aree che potrebbero ospitare un eventuale impianto di trattamento termochimico dei rifiuti non recuperabili individuati dagli Scenari 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4. Le aree considerate corrispondono alle aree idonee individuate dal 4° Aggiornamento del Piano provinciale di Gestione dei Rifiuti (sez. Rifiuti Urbani). Tali localizzazioni vengono qui discusse dal punto di vista dei potenziali impatti ambientali legati sia al trasporto dei rifiuti verso le aree individuate sia all'attività di un eventuale impianto di trattamento termico dei rifiuti situato presso una di esse. Ciò è stato fatto per supportare i decisori che dovessero trovarsi nella necessità di promuovere uno studio comparativo tra siti. Quanto qui scritto non sostituisce uno specifico studio per l'individuazione del sito più idoneo in Provincia per la ubicazione di un eventuale impianto.

4.3.2. Elenco delle aree idonee individuate dal 4° Aggiornamento del Piano provinciale di Gestione dei Rifiuti (sez. Rifiuti Urbani)

L'Allegato 9 al 4° Aggiornamento del Piano Provinciale di Gestione dei Rifiuti (Provincia Autonoma di Trento, 2014) individua le aree che saranno interessate dalle destinazioni urbanistiche "discarica", "aree di trattamento dei rifiuti" e "stazione di trasferimento". L'elenco delle aree è visualizzabile in Tabella 10.

Tabella 10. Aree idonee individuate dal 4° Aggiornamento del Piano provinciale di Gestione dei Rifiuti (Provincia Autonoma di Trento, 2014).

Denominazione sito/Destinazione d'uso	Comune	Località
Impianto di confezione di C.S.S.-combustibile di Trento	Trento	Ischia Podetti
Impianto di recupero della discarica "Isclè" di Taio con produzione di C.S.S.-combustibile e Centro Integrato	Taio	Isclè
Centro Integrato di Monclassico – Presso la discarica di Monclassico	Dimaro Folgarida	Monclassico
Centro Integrato di Pergine Valsugana	Pergine Valsugana	Vigalzano
Centro Integrato di Rovereto – Presso la discarica di Rovereto	Rovereto	Lizzana
Centro Integrato di Scurelle – Presso la discarica di Scurelle	Scurelle	Scurelle
Centro Integrato di Trento	Trento	Ravina
Centro Integrato di Vigo di Fassa	Vigo di Fassa	Vigo di Fassa
Centro Integrato di Zuclò – Presso la discarica di Zuclò	Zuclò	Zuclò

Accanto alle aree individuate del 4° Aggiornamento del Piano Provinciale di Gestione dei Rifiuti, si segnala un'ulteriore area che potrebbe essere valutata comparativamente per la possibile localizzazione di un impianto per il trattamento termico dei rifiuti urbani non recuperabili individuati dagli Scenari 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4. Si tratta dell'area che ospiterà, a lavori conclusi, l'impianto di depurazione "Trento Tre", situato nei Comuni di Trento, Calliano e Besenello e che quindi avrebbe potenzialmente bisogno di calore per l'essiccamento dei fanghi. Si segnala infine che, presso la discarica di Rovereto, è attivo un impianto di trattamento meccanico-biologico di rifiuti, finalizzato alla produzione di CSS.

4.3.3. Valutazione preliminare delle aree individuate

Essendo destinato a trattare, nelle ipotesi degli Scenari 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4, i rifiuti urbani non recuperabili dell'intero territorio provinciale, l'eventuale impianto dovrà preferibilmente essere situato in fondo valle al fine di minimizzare gli impatti legati al trasporto dei rifiuti. Così facendo, infatti, si eviterebbe il trasporto di rifiuti verso una ipotetica destinazione finale situata in quota. Se la destinazione finale (se unica) fosse situata in quota, infatti, i veicoli percorrerebbero a pieno carico un itinerario in salita e, privi di carico, un itinerario in discesa. Selezionando una destinazione in fondo valle, al contrario, si limiterebbe il trasporto dei rifiuti ai soli percorsi di discesa dai bacini di raccolta montani. In questo caso, i veicoli viaggerebbero a pieno carico solo su percorsi di discesa verso la destinazione finale. A parità di lunghezza percorsa, infatti, gli itinerari a pendenza positiva (in salita) comportano maggiori consumi e, di conseguenza, emissioni di inquinanti in atmosfera. Ubicare un impianto in un contesto di fondo valle quali la Val d'Adige o la Vallagarina potrebbe risultare strategico anche alla luce dei maggiori quantitativi di rifiuti prodotti in questi territori. Secondo le analisi merceologiche relative al 2019, infatti, i bacini di raccolta di Trento, Rovereto³, Vallagarina e Valle dell'Adige contribuiscono da soli al 42% del rifiuto residuo prodotto a livello provinciale.

Limitando in questo lavoro la discussione solo a tre ambiti territoriali, le potenziali alternative di interesse per un ragionamento tecnico sono le seguenti aree:

- Ischia Podetti (Comune di Trento), presso l'attuale sito di discarica;
- Lizzana (Comune di Rovereto), presso l'impianto di trattamento meccanico-biologico;
- Trento Tre (Comuni di Trento, Calliano e Besenello), presso il futuro nuovo depuratore.

³ Si ricorda per completezza che in occasione della proposta di impianto del 2002 la PAT aveva escluso la localizzazione a Rovereto. Le considerazioni seguenti hanno valenza tecnica e non politica.

Si sottolinea nuovamente che il presente lavoro non sostituisce un più approfondito studio sul tema scelta del sito, qualora la PAT decidesse di intraprendere la strada del recupero energetico da rifiuti urbani residui in un nuovo impianto.

Nel caso si consideri un impianto di produzione del syngas da rifiuti e di conversione di questo in prodotti di valore, senza combustione locale del syngas, dal punto di vista delle emissioni in atmosfera, le aree indicate appaiono potenzialmente di interesse per ospitare un siffatto impianto. Il processo non darebbe luogo ad emissioni confrontabili con quelle di impianti a combustione diretta o indiretta dei rifiuti, essendo presumibilmente le emissioni eventualmente legate al solo processo di purificazione del syngas. Per questo motivo, anche altre aree potrebbero risultare idonee ad ospitare un tale impianto.

Nel caso si consideri invece un impianto di incenerimento o di gassificazione dei rifiuti con sfruttamento locale del syngas mediante combustione e rilascio di fumi, l'analisi diverrebbe più complessa e strettamente legata alla specifica area considerata, oltre a richiedere maggiori e presumibilmente più lunghi approfondimenti.

L'area di Ischia Podetti è stata considerata idonea ad ospitare un impianto di termovalorizzatore dei rifiuti nel 2° e nel 3° Aggiornamento del Piano Provinciale di Gestione dei rifiuti. Tuttavia, l'area presenta criticità, evidenziate nello Studio di Impatto Ambientale del 2002, in merito alla scelta di una quota di rilascio degli inquinanti inferiore a 100 m, che richiederebbe ulteriori valutazioni dal punto di vista della meteorologia locale. D'altra parte, una altezza di camino elevata, per un impianto di piccola taglia risulterebbe atipica e paesaggisticamente impattante.

L'area presso l'impianto di trattamento meccanico-biologico di Rovereto risulterebbe di interesse per i casi degli Scenari 3.3 e 3.4, che prevedono di sottoporre il rifiuto residuo (in quantità differenti che dipendono dalle ipotesi considerate nei singoli scenari) a biostabilizzazione e di utilizzare il CSS prodotto come input all'impianto di trattamento termico. In questo caso, si minimizzerebbe la distanza tra luogo di produzione di CSS e luogo di conversione energetica dello stesso.

L'area del futuro depuratore "Trento 3" potrebbe risultare logisticamente compatibile con un impianto di trattamento termico dei rifiuti nel caso si valutasse l'opportunità di trattare anche i fanghi essiccati prodotti in loco. Tuttavia, la presenza della parete rocciosa sul lato est potrebbe risultare critica in termini di dispersione dei fumi in atmosfera e amplificare le ricadute a livello del suolo.

Per tutte le soluzioni, si richiede comunque una caratterizzazione approfondita della meteorologia locale, incluso il sito di Ischia Podetti nel caso di altezza del camino inferiore a 100 m. Tale caratterizzazione richiederebbe almeno una campagna di monitoraggio estiva ed una invernale. Come riportato al paragrafo 4.2, inoltre, tutte le soluzioni che prevedano tecnologie di combustione comporterebbero una durata del percorso autorizzativo fino a 270 giorni, che va considerata nell'ottica di gestire il transitorio tra la situazione attuale e la situazione ad impianto operativo. Inoltre, il valore di accettabilità del rischio cancerogeno emerso dallo Studio di Fattibilità del 2009 (10^{-7}) comporterebbe una duplice difficoltà:

- 1) la compatibilità delle tecnologie di abbattimento impiegabili nella linea fumi con i valori da garantire al camino risultanti dall'analisi di rischio volta a garantire il rispetto del massimo rischio cancerogeno di 10^{-7} ;
- 2) la valutazione stessa del rispetto del rischio cancerogeno di 10^{-7} tramite monitoraggi sul territorio (come discusso al paragrafo 4.1).

Per coerenza con il già citato Studio di Fattibilità del 2009, l'impianto di combustione dovrebbe essere inoltre dotato di un sistema di misurazione in continuo di PCDD/F e prevedere la caratterizzazione periodica del Cr VI al camino.

Una strategia di mitigazione degli impatti locali potrebbe riguardare l'adozione di un approccio modulare sugli impianti, ossia l'ubicazione di più moduli di trattamento termico dei rifiuti in diverse aree che fossero dimostrate idonee ad ospitarli. Ciò comporterebbe di suddividere il carico emissivo su più aree, riducendone gli impatti al suolo, alla condizione, però, che la modalità di rilascio rimanga invariata (o sia migliorativa) rispetto alla soluzione con unico impianto. Ovviamente ciò avrebbe senso nel caso di utilizzo di una tecnologia compatibile con taglie di impianti particolarmente piccole, in grado di garantire (come nel caso di soluzione ad impianto centralizzato) una sostenibilità economica nella gestione dei flussi, una affidabilità gestionale dell'approccio, con disponibilità (da esperienze pregresse) di dati emissivi non autoreferenziali, ma validati da enti terzi.

4.4. Considerazioni sul concetto di *End-of-Waste*

Il trattamento termico dei rifiuti produce residui solidi quali ceneri e scorie. I residui vetrificati prodotti da un impianto di gassificazione possono essere avviati al riutilizzo e, quindi, essere considerati prodotto e non più rifiuto se:

- Rispondono alle condizioni fissate dall'art. 184-ter del D.Lgs. 152/2006 per poter attribuire al materiale vetrificato la caratteristica di *end-of-waste*:
 - a) la sostanza o l'oggetto sono destinati a essere utilizzati per scopi specifici;
 - b) esiste un mercato o una domanda per tale sostanza od oggetto;
 - c) la sostanza o l'oggetto soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetta la normativa e gli standard esistenti applicabili ai prodotti;
 - d) l'utilizzo della sostanza o dell'oggetto non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana.

In particolare, con riferimento al punto c) il materiale vetrificato potrà essere riutilizzato in opere edili, stradali e ambientali se rispetta gli standard tecnici definiti nella Circolare del Ministero dell'Ambiente N. 5205 del 15/07/2005 "Indicazioni per l'operatività nel settore edile, stradale e ambientale, ai sensi del decreto ministeriale 8 maggio 2003, n. 203", che riporta nell'allegato C le caratteristiche prestazionali per l'impiego nelle opere civili e stradali. In analogia a quanto già applicato in impianti che producono aggregati riciclati il materiale vetrificato dovrà anche essere soggetto a test di cessione di cui all'allegato 3 al D.M. 05/02/98 e s.m.i.. Si fa notare che i materiali vetrosi possono essere riciclati fino a un massimo del 15% in peso negli aggregati riciclati destinati ai rilevati ed ai sottofondi stradali.

- Sono prodotti in impianti che recuperano o riciclano i rifiuti e dai quali usciranno materiali non più considerabili come rifiuti. La conformità degli impianti sarà valutata "caso per caso", in base a quanto stabilito dal comma 3 ter dell'art. 184 ter. In base a tale articolo, modificato di recente dalla legge 128 del 02 novembre 2019, si stabilisce che ISPRA o l'ARPA/APPA, territorialmente competente e comunque delegata da Ispra, rilasci le autorizzazioni agli impianti che producono "*end-of-waste*". Gli impianti autorizzati verranno assoggettati a controlli a campione, effettuati da ISPRA o dall'agenzia da essa delegata, per verificare la conformità delle modalità operative

e gestionali, i rifiuti in ingresso, i processi di recupero e le sostanze o oggetti in uscita. L'esito positivo dei controlli è parte essenziale della conservazione della qualifica di "end-of-waste" dei materiali vetrificati prodotti dall'impianto.

Nel 2020 il Servizio Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA) ha approvato e pubblicato le "Linee guida del sistema nazionale per la protezione dell'ambiente per l'applicazione della disciplina "end-of-waste" di cui all'art. 184 ter del D.lgs. n° 152/2006". Il documento illustra le modalità con cui avverranno i controlli sugli impianti autorizzati a recuperare i rifiuti secondo la disciplina "end-of-waste".

Si precisa che gli impianti di combustione diretta di rifiuti possono già oggi destinare le scorie prodotte a riciclo in impianti (generalmente centralizzati) dedicati al recupero di inerte e metalli. L'attivazione o meno di tale opzione dipende spesso da una verifica economica della convenienza rispetto allo smaltimento in discarica.

4.5. Matrici ambientali

Gli studi specialistici che dovranno valutare l'alternativa progettuale scelta dovranno avere i contenuti minimi nel seguito descritti. Inoltre, dovrà essere approfondito lo stato ambientale dell'alternativa zero, descrivendone le condizioni ambientali delle matrici ambientali e valutandone eventuali criticità rispetto alla vigente normativa provinciale, nazionale ed europea in materia.

- Impatti sull'atmosfera
 - Emissioni in atmosfera generate dalla realizzazione del progetto (emissioni convogliate, diffuse e diffuse ed emissioni odorigene)
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali

- Impatti sull'ambiente Idrico
 - Acque superficiali
 - Uso della risorsa
 - Qualità dell'acqua
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali
 - Acque sotterranee
 - Aumento della vulnerabilità dell'acquifero
 - Alterazione della morfologia della risorsa
 - Contaminazione delle acque sotterranee
 - Utilizzo della risorsa
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali

- Impatti sul suolo e sottosuolo
 - Suolo
 - Modificazione assetto geomorfologico
 - Sottrazione di suolo

- Contaminazione del suolo
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali
 - Sottosuolo
 - Sottrazione di sottosuolo
 - Contaminazione del sottosuolo
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali
- Impatti sulla vegetazione
 - Flora
 - Fauna
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali
- Impatti sugli ecosistemi e sul clima
 - Gas ad effetto serra
 - Bilancio CO₂
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali
- Impatti sulla popolazione e rischi per la salute umana, il patrimonio culturale, il paesaggio o l'ambiente
 - Rischi da contaminazione dell'aria
 - Rumore
 - Incidentalità stradale
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali
- Impatti derivanti da rumore e vibrazioni, nonché da luce, calore, radiazioni
 - Effetti dell'opera
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali
- Impatti sul paesaggio, sul patrimonio culturale e agroalimentare e sui beni materiali
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali
- Impatti derivanti dall'emissione di inquinanti, luce, calore, radiazioni, dalla creazione di sostanze nocive e dallo smaltimento dei rifiuti
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali

- Impatti derivanti dall'utilizzazione delle risorse naturali, in particolare del territorio, del suolo, delle risorse idriche e della biodiversità, tenendo conto, per quanto possibile, della disponibilità sostenibile di tali risorse
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali

- Impatti derivanti dalla vulnerabilità del progetto ai rischi di gravi incidenti e/o calamità che sono pertinenti per il progetto in questione
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali

- Impatti derivanti dal cumulo con gli effetti derivanti da altri progetti esistenti e/o approvati, tenendo conto di eventuali criticità ambientali esistenti, relative all'uso delle risorse naturali e/o ad aree di particolare sensibilità ambientale suscettibili di risentire degli effetti derivanti dal progetto
 - Mitigazioni
 - Compensazioni ambientali

5. Confronto tra le soluzioni analizzate

Da un punto di vista strettamente quantitativo, tutti gli scenari analizzati come alternative alla situazione attuale, considerando la necessità, imposta a livello legislativo, di stabilizzare il rifiuto residuo da smaltire in discarica, comportano una riduzione del rifiuto da inviare a smaltimento. Anche nei casi in cui non si consideri la realizzazione di un impianto di conversione dei rifiuti a livello locale, si riesce a rientrare nel limite del 10% dei rifiuti prodotti richiesto dal D.Lgs. 36/2003, o aumentando la quota di rifiuti da smaltire fuori provincia o massimizzando il recupero di materiale dalla raccolta differenziata. Si osserva, inoltre, che pur realizzando un impianto di conversione termo-chimico, nel caso in cui si decidesse di optare per l'invio di tutto il residuo a TMB (Scenario 3.3) per migliorare la qualità del combustibile da inviare all'impianto, si avrebbe una produzione consistente di biostabilizzato da smaltire in discarica (7,10% dei rifiuti prodotti).

Si possono dedurre delle considerazioni importanti dai risultati mostrati, che non vogliono proporre una soluzione ottimale, ma solamente portare all'attenzione che la realizzazione di un impianto di conversione energetica dei rifiuti in Trentino, consentirebbe di avere l'autonomia completa sulla gestione del rifiuto residuo urbano, perché non vi sarebbe necessità di smaltire rifiuti fuori provincia, come invece avviene oggi o risulta necessario negli altri scenari considerati, anche nella prospettiva di massimizzare il recupero di materiale. Il miglioramento delle rese della raccolta differenziata sarebbe di per sé sufficiente a garantire una diminuzione dei flussi di residuo a discarica, ma a fronte dell'invio fuori provincia di volumi di rifiuti maggiori rispetto a quelli attuali, per cui bisognerebbe trovare disponibilità che al momento non ci sono e tenere in conto i significativi oneri economici che questa operazione richiederebbe. L'impatto ambientale di un nuovo impianto e l'investimento necessario per la

sua realizzazione sono comunque aspetti da non sottovalutare, anzi da valutare con attenzione considerando i potenziali benefici sul medio-lungo periodo.

Dal punto di vista degli impatti ambientali, le soluzioni che prevedono la gassificazione e l'utilizzo *ex situ* del *syngas* o la conversione del *syngas* in prodotti chimici di valore sono sicuramente preferibili alla luce delle considerazioni espresse nel capitolo 0. Non realizzandosi uno sfruttamento del *syngas* tramite combustione in loco, si avrebbero rilasci locali di inquinanti atmosferici significativamente inferiori rispetto ad impianti di combustione locale del rifiuto o del *syngas*. L'impiego di processi di gassificazione ha a suo tempo incontrato il parere favorevole dell'Associazione Italiana di Epidemiologia, che inquadra la gassificazione come un processo più adatto a bacini di utenza piccoli e virtuosi dal punto di vista del recupero dei rifiuti (Associazione Italiana di Epidemiologia, 2008).

Tuttavia, una valutazione completa degli impatti richiede una comprensione dettagliata dei processi di trattamento del *syngas* per consentirne la compatibilità con l'uso finale. Sia che si tratti di combustione che di conversione in altri prodotti, il processo di gassificazione produce scorie e ceneri (cfr. paragrafo 4.4). Inoltre, il *syngas* in uscita dalla gassificazione deve essere sottoposto a processi depurativi preliminari al fine di rimuovere impurità come idrogeno solforato (H_2S), solfuro di carbonile (COS), acido cloridrico (HCl), polveri ed ammoniaca. Tali impurità, se non gestite correttamente, potrebbero comportare problemi di corrosione e di usura nelle fasi successive di sfruttamento del *syngas* o l'avvelenamento di catalizzatori nel caso di utilizzo di processi catalitici per la depurazione e/o la conversione (Zhang et al., 2012). Il *syngas* grezzo contiene inoltre ammoniaca in concentrazioni che dipendono dall'input alla gassificazione. L'ammoniaca rappresenta il precursore degli ossidi di azoto in caso di combustione del *syngas*. I metodi più utilizzati per rimuovere le polveri prevedono l'utilizzo di cicloni o filtri a candela. I processi più comunemente impiegati per la rimozione di composti a base di zolfo (H_2S e COS), gas acidi (HCl e anidride carbonica) e ammoniaca si basano invece sull'utilizzo di scrubber, in pressione e non. L'impiego di processi ad umido comporta la produzione di acqua reflua contaminata dalle impurità rimosse, che deve essere smaltita. Al fine di recuperare i solventi utilizzati nel processo di lavaggio, sono previsti processi di strippaggio che danno luogo ad un effluente gassoso concentrato nelle specie rimosse (Woolcock & Brown, 2013). Al fine di evitare rilasci in atmosfera dei composti rimossi, è opportuno introdurre uno step di purificazione aggiuntiva (es., biofiltrazione, adsorbimento su carboni attivi, adsorbimento su ossidi metallici o trattamenti termici/catalitici, a seconda della concentrazione) oppure recuperare composti di valore commerciale (es., zolfo) (Zhang et al., 2012; Woolcock & Brown, 2013). Per ovviare agli inconvenienti di un processo ad umido, è preferibile optare per processi a secco a base di filtri catalitici e/o adsorbimento su composti quali carbonati di sodio, potassio e calcio o calce viva (con formazione di sali di cloro e/o zolfo) (Marcantonio et al., 2021). Si tratta di processi favoriti dalle alte temperature di uscita del *syngas* dalla gassificazione, che quindi non richiedono uno step intermedio di raffreddamento (Asadullah, 2014; Marcantonio et al., 2021).

Il *syngas* pretrattato, se non utilizzato come combustibile, è successivamente sottoposto a trattamenti che dipendono dal prodotto finale desiderato. Nel caso di produzione di metanolo e dimetil etere (DME), ad esempio, il percorso prevede un processo di *Water Gas Shift* (WGS), per arricchire il contenuto di idrogeno, e passaggi di rimozione di anidride carbonica e acqua. È previsto poi un processo di sintesi e distillazione del metanolo, che produce un flusso di sottoprodotti di distillazione (etanolo, butanolo e propanolo). Inoltre, viene solitamente utilizzato un processo del tipo *Pressure Swing Adsorption* (PSA) per

recuperare idrogeno dallo step precedente. Avviene infine il rilascio in atmosfera del gas di spurgo, che potrebbe contenere come inquinanti tracce di monossido di carbonio (se non completamente convertito in metanolo) e di ogni altra specie non completamente rimossa, convertita o intercettata negli step precedenti. Nel caso di produzione di DME, viene effettuata una disidratazione del metanolo, che viene impiegato per la sintesi e distillazione del DME.

Nel complesso, il trattamento del syngas può prevedere rilasci in atmosfera ed in soluzione acquosa che dipendono da scelte progettuali legate ai processi di trattamento (ad umido o a secco), all'efficienza di questi, ai processi di recupero e alle rese di conversione nei prodotti finali.

6. Conclusioni e raccomandazioni

Punto di partenza della presente attività di ricerca è stata la condivisione tra enti, promossa dalla PAT, dei dati quali-quantitativi relativi al settore dei rifiuti urbani. Il settore dei rifiuti speciali è stato oggetto di alcuni ragionamenti preliminari, ma, su indicazione della PAT il presente lavoro ha avuto come focus il solo settore dei rifiuti urbani, lasciando ai decisori politico-amministrativi l'opportunità di integrare le valutazioni effettuate con i rifiuti speciali.

Il settore dei rifiuti urbani risente del periodo di pandemia, per cui si è ritenuto opportuno far riferimento ai dati del 2019, con la raccomandazione di aggiornare la situazione una volta che il contesto ritorni alla normalità; ciò anche perché una informazione aggiornata permetterà di calibrare meglio il dimensionamento di qualunque opzione di trattamento dovesse essere scelta. Peraltro, in fase di discussione, è emerso da informazioni messe a disposizione dalla PAT che negli ultimi anni, a fronte di un obiettivo di riduzione del 5% della produzione di rifiuti urbani, si è invece notato un aumento di circa 1% all'anno. Un possibile obiettivo di lunga scadenza potrebbe essere quindi il mantenimento del quantitativo 2019.

Gli scenari oggetto della presente ricerca sono caratterizzati da una contrapposizione tra discarica di rifiuti pretrattati e recupero energetico. In questa dicotomia si inserisce una indicazione della Unione Europea che pone come obiettivo il conferimento a discarica di non più del 10% dei rifiuti urbani prodotti entro il 2035.

Qualunque sia l'opzione che dovesse essere scelta, sempre dall'Unione Europea arriva una indicazione in chiave economica: il recupero di materia è prioritario, ma deve tener conto di una sostenibilità economica delle scelte. Al riguardo si sottolinea che tale aspetto non fa parte dei contenuti del presente lavoro.

Con riferimento al contesto trentino, è particolarmente utile l'informazione prodotta dalla PAT in periodo pre-COVID (2019 e inizio 2020) circa la composizione dei rifiuti urbani indifferenziati in Trentino. Dai dati è possibile ricavare la percentuale di materiali riciclabili ancora presenti nei rifiuti urbani indifferenziati. In pratica, tali dati evidenziano che con un ulteriore incremento dell'efficienza della raccolta differenziata, anche introducendo una rivisitazione dei flussi di materiali di interesse, ci si può avvicinare significativamente al limite del 10% di cui sopra.

A livello decisionale si prospettano due macro-scenari:

- a) Chiudere il ciclo con una discarica (aumentando quindi nel tempo i volumi disponibili) accettando la possibilità di non rispettare l'obiettivo 10% della Unione Europea

b) Chiudere il ciclo con una opzione di recupero energetico

Il presente lavoro ha approfondito, su indicazione della PAT, il secondo macro-scenario. Al riguardo va segnalato che, nel caso la decisione politico-amministrativa fosse questa:

- la scala dell'impianto sarebbe ridotta, con conseguente orientamento tecnologico verso sistemi diversi dalla combustione diretta in impianto dedicato (che risente maggiormente di un effetto scala);
- andrebbe comunque verificata la possibilità di gestire parte del flusso di rifiuti urbani indifferenziati in ambito regionale (come consentito dalla normativa) vista la presenza dell'inceneritore di Bolzano a distanza utile.

Inoltre, nel caso di orientamento verso un impianto dedicato da localizzarsi in Trentino, va segnalato che:

- andrebbe caratterizzato con adeguato dettaglio il contenuto energetico dei rifiuti previsti in ingresso all'impianto, in modo da ottimizzare il dimensionamento; allo stato attuale, in prima approssimazione, si può considerare un potere calorifico dei rifiuti in input pari a 13 MJ/kg;
- andrebbe valutato se puntare ad una soluzione che chiuda il trattamento con un recupero energetico in loco oppure con la generazione di prodotti (es., metanolo, dimetil etere, ecc.) da utilizzare non in loco;
- andrebbe individuato (mediante studio comparativo) un sito idoneo per la ubicazione dell'impianto, curando che la disponibilità di dati meteorologici locali sia adeguata per avere un input affidabile per una modellazione di dispersione e deposito degli inquinanti emessi in atmosfera (nel caso l'impianto non fosse a emissioni zero, in atmosfera).

Nel presente lavoro sono riportate anche indicazioni specifiche per una integrazione della normativa esistente in merito all'impatto ambientale, che tengono conto delle ultime risultanze della ricerca in tale settore. È stata inoltre inserita una nota relativa alle potenzialità dell'*end of waste* come opzione virtuosa ad integrazione del recupero energetico da rifiuti. Si è accennato infine ad uno scenario, non convenzionale, che potrebbe prevedere di operare su più siti riducendo la scala di ciascun impianto (si ricorda al riguardo, che una tecnologia modulare è attualmente in fase di autorizzazione per alcuni test in un sito in provincia di Trento).

Bibliografia

- Adami, L., Schiavon, M., Rada, E.C., 2021. Potential environmental benefits of direct electric heating powered by waste-to-energy processes as a replacement of solid-fuel combustion in semi-rural and remote areas. *Sci. Tot. Environ.* 740, 140078.
- Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro, 2021. List of Classifications - IARC Monographs on the identification of carcinogenic hazards to humans. <https://monographs.iarc.fr/list-of-classifications/>



- APAT – Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici, 2008. Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati.
- ARPA Emilia-Romagna, 2011. Le emissioni degli inceneritori di ultima generazione. <https://www.arpae.it/it/documenti/pubblicazioni/le-emissioni-degli-inceneritori-di-ultima-generazione>
- Asadullah, M., 2014. Biomass gasification gas cleaning for downstream applications: A comparative critical review. *Ren. Sust. Energy Rev.* 40, 118–132.
- Associazione Italiana di Epidemiologia, 2008. Trattamento dei rifiuti e salute: Posizione dell'Associazione italiana di epidemiologia. *Epidemiol. Prev.* 32, 183–187.
- Bano, M., Khan, I., Ahirwar, D., Khan, F., 2020. *React. Funct. Polym.* 150, 104545. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104545>
- CET Società Cooperativa, 2010. Studi di Impatto Ambientale – Impianto di Depurazione “Trento Tre”.
- Costa, J., Santos, R.R., Virgolino, A., Reis, M.F., 2019. Solid Waste Incinerators: Health Impacts, in: Nriagu, J. (Ed.), *Encyclopedia of Environmental Health (Second Edition)*. Elsevier, pp. 771–784.
- Huang, D., Wang, G., Shi, Z., Li, Z., Kang, F., Liu, F., 2017. Removal of hexavalent chromium in natural groundwater using activated carbon and cast iron combined system. *J. Clean. Prod.* 155, 667–676.
- JRC – Joint Research Centre, 2019. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-01/JRC118637_WI_Bref_2019_published_0.pdf
- Marcantonio, V., Müller, M., Bocci, E., 2021. A Review of Hot Gas Cleaning Techniques for Hydrogen Chloride Removal from Biomass-Derived Syngas. *Energies* 14, 6519.
- Miyake, Y., Tokumura, M., Iwazaki, Y., Wang, Q., Amagai, T., Horii, Y., Otsuka, H., Noboru, T., Kobayashi, T., Oguchi, M., 2017. Determination of hexavalent chromium concentration in industrial waste incinerator stack gas by using a modified ion chromatography with post-column derivatization method. *J. Chromatogr. A*, 1502, 24–29.
- Nadal, M., Mari, M., Schuhmacher, M., Domingo, J.L., 2019. Monitoring dioxins and furans in plasma of individuals living near a hazardous waste incinerator: Temporal trend after 20 years. *Environ. Res.* 173, 207–211.
- Nath, M., Song, S., Garbers-Craig, A.M., Li, Y., 2018. Phase evolution with temperature in chromium-containing refractory castables used for waste melting furnaces and Cr(VI) leachability. *Ceram. Int.* 16, 20391–20398.
- Provincia Autonoma di Trento, 2006. Piano Provinciale di Smaltimento dei rifiuti. Terzo Aggiornamento: Rifiuti Urbani. http://www.appa.provincia.tn.it/pianificazione/Piano_smaltimento_rifiuti
- Provincia Autonoma di Trento, 2014. 4° Aggiornamento del Piano provinciale di Gestione dei Rifiuti – Sezione Rifiuti Urbani. Assessorato alle infrastrutture e all'ambiente. <https://adep.provincia.tn.it/content/download/12107/224041/version/1/file/01.+QUARTO+AGGIORNAMENTO+PIANO+GESTIONE+RIFIUTI+-+SEZIONE+RIFIUTI+URBANI.pdf>
- Provincia Autonoma di Trento, 2019. Inventario delle emissioni della Provincia Autonoma di Trento - Anno 2015. [http://www.appa.provincia.tn.it/binary/pat_appa_restyle/tutela_aria/PR3850000000000000000000093120.1589874756.pdf](http://www.appa.provincia.tn.it/binary/pat_appa_restyle/tutela_aria/PR385000000000000000093120.1589874756.pdf)



- Pradhan, D., Sukla, L.B., Sawyer, M., Rahman, P.H.S.M., 2017. Recent bioreduction of hexavalent chromium in wastewater treatment: A review. *J. Ind. Eng. Chem.* 55, 1–20.
- Rada, E.C., Schiavon, M., Torretta, V., 2021. A regulatory strategy for the emission control of hexavalent chromium from waste-to-energy plants. *J. Clean Prod.* 278, 123415.
- Schiavon, M., Ragazzi, M., Rada, E.C., 2013. A proposal for a diet-based local PCDD/F deposition limit. *Chemosphere* 93, 1639–1645.
- Schiavon, M., Torretta, V., Rada, E.C., Ragazzi, M., 2016. State of the art and advances in the impact assessment of dioxins and dioxin-like compounds. *Environ. Monit. Assess.* 188, 57.
- Schiavon, M., Rada, E.C., Adami, L., Fox, F., Ragazzi, M., 2019. Integrated methodology for the management of human exposure to air pollutants. *WIT Trans. Ecol. Environ.* 236, 287–296.
- Shah, P., Strezov, V., Nelson, P.F., 2012. Speciation of chromium in Australian coals and combustion products. *Fuel* 102, 1–8.
- Sun, H., Brocato, J., Costa, M., 2015. Oral Chromium Exposure and Toxicity. *Curr. Environ. Health Rep.* 2, 295–303.
- Świetlik, R., Trojanowska, M., Łożyński, M., Molik, A., 2014. Impact of solid fuel combustion technology on valence speciation of chromium in fly ash. *Fuel* 137, 306–312.
- Tiwari, A.K., Orioli, S., De Maio, M., 2019. Assessment of groundwater geochemistry and diffusion of hexavalent chromium contamination in an industrial town of Italy. *J. Contam. Hydrol.* 225, 103503.
- UK Environment Agency, 2017. Releases from municipal waste incinerators - Guidance to applicants on impact assessment for group 3 metals stack. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/532474/LIT_7349.pdf
- US EPA, 1996a. Method 0060 – Determination of metals in stack emissions. United States Environmental Protection Agency.
- US EPA, 1996b. Method 0061 – Determination of hexavalent chromium emissions from stationary sources. United States Environmental Protection Agency.
- US EPA, 2005. Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities. https://rais.ornl.gov/documents/2005_HHRAP.pdf
- US EPA, 2011. Exposure Factors Handbook (Final Report). <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=236252>
- US EPA, 2017. Users' Guide and Background Technical Document for USEPA Region 9's Preliminary Remediation Goals (PRG) Table. <https://semspub.epa.gov/work/02/103453.pdf>
- US EPA, 2019. Regional Screening Level (RSL) Subchronic Toxicity Supporting Table November 2019. <https://semspub.epa.gov/work/HQ/199660.pdf>
- Wang, H., Cui, H., Song, X., Xu, R., Wei, N., Tian, J., Niu, H., 2020. Facile synthesis of heterojunction of MXenes/TiO₂ nanoparticles towards enhanced hexavalent chromium removal. *J. Colloid Interface Sci.* 561, 46–57.
- Woolcock, P.J., Brown, R.C., 2013. A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas. *Biomass and Bioenergy* 52, 54-84.
- Yao, B., Liu, M., Gao, Y., Liu, Y., Cong, S., Zou, D., 2020. Removal of hexavalent chromium in aqueous solution using organic iron-based composites synthesized and immobilized by natural dried willow leaves. *J. Clean. Prod.* 247, 119132.
- Zhang, W., Liu, H., Ul Hai, I., Neubauer, Y., Schröder, P., Oldenburg, H., Seilkopf, A., Kölling, A., 2012. Gas cleaning strategies for biomass gasification product gas. *Int. J. Low-Carbon Technol.* 7, 69-74.