

ANALISI DEGLI IMPATTI AMBIENTALI DERIVANTI  
DALL'IMPIEGO DI MATERIALE RICICLATO DA  
PAVIMENTAZIONI STRADALI IN ALTERNATIVA AI  
MATERIALI VERGINI



Repubblica e Cantone Ticino  
Dipartimento del territorio

## INFORMAZIONI SUL DOCUMENTO

<b>Titolo</b>	Analisi degli impatti ambientali derivanti dall'impiego di materiale riciclato da pavimentazioni stradali in alternativa ai materiali vergini
<b>Commissionato da</b>	Repubblica e Cantone Ticino Dipartimento del territorio Divisione dell'ambiente Sezione protezione aria, acqua e suolo <b>Ufficio dei rifiuti e dei siti inquinati</b>

## INDICE DEI CONTENUTI

<b>Sintesi del documento</b> .....	<b>4</b>
<b>Abbreviazioni e acronimi</b> .....	<b>5</b>
<b>1. Contesto</b> .....	<b>6</b>
<b>2. Obiettivi dello studio e metodologia</b> .....	<b>6</b>
2.1. Obiettivi dello studio.....	6
2.2. Metodologia e confini del sistema.....	6
2.3. Banche dati.....	7
2.4. Unità funzionale ed indicatore di impatto.....	7
2.5. Limitazioni dello studio.....	8
<b>3. Analisi effettuate e risultati</b> .....	<b>9</b>
3.1. Panoramica dei risultati.....	9
3.1.1. Descrizione dell'analisi.....	9
3.1.2. Cambiamento climatico.....	10
3.1.3. Punteggio ambientale aggregato (UBP totale).....	11
3.1.4. Rifiuti, non radioattivi.....	13
3.1.5. Risorse Energetiche.....	14
3.1.6. Contaminanti in aria e particolato.....	15
<b>4. Analisi di sensitività</b> .....	<b>16</b>
4.1. Manutenzioni aggiuntive per lo Scenario ad Integrazione di RA maggiorata.....	16
<b>5. Conclusioni</b> .....	<b>18</b>
<b>6. Bibliografia</b> .....	<b>19</b>
<b>1. <a href="#">Swiss Eco-Factors 2021 according to the Ecological Scarcity Method</a></b> .....	<b>19</b>
<b>2. <a href="#">ecoinvent</a></b> .....	<b>19</b>
<b>3. <a href="#">Società a 200 watt - svizzeraenergia</a></b> .....	<b>19</b>

# Sintesi del documento

Il presente studio, commissionato dall'**Ufficio dei rifiuti e dei siti inquinati del Cantone Ticino** e sviluppato da **Quantis**, ha l'obiettivo di valutare gli **impatti ambientali associati a tre scenari alternativi di pavimentazione stradale** bituminosa, con diverse percentuali di utilizzo di **asfalto riciclato (RA)**.

L'analisi è stata condotta secondo l'approccio di **Life Cycle Assessment (LCA)** e utilizza la metodologia **UBP 2021<sup>1</sup>** (Umweltbelastungspunkte) elaborata dall'**Ufficio federale dell'ambiente (UFAM)**, che consente di misurare e confrontare gli impatti ambientali in base a obiettivi e limiti normativi svizzeri.

Gli scenari analizzati si differenziano come segue:

- **Scenario in assenza di RA:** utilizzo esclusivo di materiali vergini.
- **Scenario RA tradizionale:** integrazione di RA al 60% nello strato portante.
- **Scenario RA maggiorata:** integrazione di RA al 100% nel portante e 70% nello strato di usura.

**L'unità funzionale** considerata è la **realizzazione e gestione, su un orizzonte temporale di 40 anni, di un tratto stradale lungo 100 metri**. Lo studio include tutte le fasi rilevanti: estrazione, produzione, trasporto, costruzione, manutenzione e fine vita.

I risultati mostrano che:

- Lo **scenario RA maggiorata** è il più performante in tutte le categorie ambientali analizzate, con una **riduzione del 37% dell'impronta climatica rispetto allo scenario ad integrazione di RA tradizionale**.
- L'indicatore dei **rifiuti non radioattivi** rappresenta l'impatto principale nel bilancio ambientale, evidenziando il ruolo critico della gestione a fine vita.
- Le **fasi di estrazione e produzione di materiali vergini** sono le più impattanti negli scenari meno circolari.
- Le **fasi operative (costruzione, trasporto, fresatura)** risultano secondarie dal punto di vista ambientale.

Un'**analisi di sensitività** ha considerato l'eventualità di **manutenzioni aggiuntive** nello scenario RA maggiorata. Anche nei casi peggiorativi, tale configurazione mantiene un **vantaggio netto** rispetto alle alternative più convenzionali, confermando la **robustezza ambientale** della soluzione.

In conclusione, lo studio evidenzia che l'**utilizzo estensivo di RA**, rappresenta una **leva concreta per ridurre l'impatto ambientale delle infrastrutture stradali**, in linea con i principi dell'economia circolare e con gli obiettivi di sostenibilità del Cantone.

# Abbreviazioni e acronimi

**RA** – Reclaimed Asphalt (Asfalto Riciclato)

**LCA** – Life Cycle Assessment (Analisi del Ciclo di Vita)

**UBP** – Umweltbelastungspunkte (Punti di impatto ambientale)

**BAFU** – Bundesamt für Umwelt (Ufficio federale dell'ambiente – Svizzera)

**MJ** – MegaJoule

**CO<sub>2</sub>eq** – CO<sub>2</sub> equivalente

**PM<sub>10</sub> / PM<sub>2.5</sub>** – Particolato fine (diametro  $\leq 10\mu\text{m}$  o  $\leq 2.5\mu\text{m}$ )

**NO<sub>x</sub>** – Ossidi di azoto

**NMVO**C – Composti organici volatili non metanici

# 1. Contesto

Il presente studio si inserisce nell'ambito delle iniziative del **Cantone Ticino** volte a promuovere una **gestione sostenibile delle infrastrutture stradali**, in linea con gli obiettivi di riduzione dell'impatto ambientale e di valorizzazione delle risorse secondarie. In particolare, il mandato risponde alla necessità di valutare, su base scientifica e comparativa, i benefici ambientali potenziali derivanti dall'impiego di **asfalto riciclato (RA)** nella realizzazione di pavimentazioni bituminose, rispetto alle soluzioni tradizionali basate su materiali vergini.

## 2. Obiettivi dello studio e metodologia

### 2.1. Obiettivi dello studio

Lo scopo del presente studio è valutare la soluzione più sostenibile dal punto di vista ambientale per la realizzazione di pavimentazioni stradali bituminose, considerando diversi scenari di impiego di asfalto contenente materiale riciclato (RA, Reclaimed Asphalt). In particolare, il confronto si concentra su tre alternative progettuali che differiscono per la percentuale di RA impiegata nei due strati funzionali della pavimentazione (strato portante e strato di usura):

- **Scenario in assenza di RA:** 0% RA – utilizzo esclusivo di materiali vergini per entrambi gli strati.
- **Scenario RA tradizionale:** 60% RA nello strato portante, 0% nello strato di usura.
- **Scenario RA maggiorato:** 100% RA nello strato portante, 70% nello strato di usura.

### 2.2. Metodologia e confini del sistema

La metodologia utilizzata per il presente studio è l'analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment – LCA), condotta in conformità con le norme internazionali ISO 14040:2006 e ISO 14044:2018.

Lo studio adotta un approccio **“from cradle to grave”**, includendo le seguenti fasi:

- **Estrazione delle materie prime** (aggregati e bitume)
- **Produzione dei conglomerati bituminosi**
- **Trasporto dei materiali al sito di produzione e al cantiere**

- **Costruzione del tratto stradale**
- **Manutenzione** nel corso di 40 anni di vita utile
- **Fine vita**, con riciclo o smaltimento in discarica

La **fase d'uso** non è stata inclusa nell'analisi LCA in quanto la sua modellazione, legata al consumo di carburante dei veicoli che percorrono il tratto stradale, può essere influenzata da numerosi fattori non direttamente legati alla composizione della pavimentazione, tra cui:

- il tipo di veicolo (diesel, benzina, elettrico),
- lo stile di guida,
- le condizioni di traffico,
- la manutenzione del fondo stradale,
- la chiusura temporanea di corsie o deviazioni.

Per la modellazione del **fine vita** è stato applicato l'approccio "**cut-off**", che esclude i carichi ambientali dei processi precedenti al punto di riciclo: le emissioni legate alle operazioni di recupero (es. frantumazione, selezione) sono attribuite al ciclo precedente, mentre il **RA** è considerato **privo di carico ambientale** ("burden free") al momento del suo ingresso nei nuovi scenari.

## 2.3. Banche dati

I dati utilizzati per la modellazione provengono sia da **fonti primarie** (per estrazione, produzione e riciclo), sia da **fonti secondarie** (letteratura scientifica per trasporti, costruzione, uso e fresatura).

Per lo studio è stata utilizzata la banca dati **ecoinvent<sup>2</sup>**, sviluppata e aggiornata dall'omonima associazione fondata dai politecnici federali di Zurigo (ETH Zurich) e Losanna (EPF Lausanne), dall'Istituto Paul Scherrer, dai Laboratori Federali Svizzeri di Scienza e Tecnologia dei Materiali (EMPA), e da Agroscope, l'Istituto di Scienze per la sostenibilità.

**In questo progetto è stata utilizzata la versione 3.10 di ecoinvent**, privilegiando, quando disponibili, i dataset specifici per la Svizzera.

## 2.4. Unità funzionale ed indicatore di impatto

L'**unità funzionale** dello studio rappresenta il servizio fornito dal sistema oggetto di analisi, ovvero:

**“Garantire la mobilità veicolare su un tratto stradale lungo 100 metri per un periodo di 40 anni,** attraverso la costruzione, manutenzione e gestione a fine vita della pavimentazione bituminosa.”

L’analisi degli impatti ambientali si basa sul metodo di valutazione svizzero **UBP 2021<sup>1</sup>** (*Umweltbelastungspunkte*), sviluppato dall’Ufficio federale dell’ambiente (**BAFU**). Questo metodo permette di valutare numerosi impatti ambientali con una **metrica comune** (i **punti di impatto ambientale**, o **UBP**), consentendo il confronto diretto tra categorie diverse e la possibilità di calcolare un **“single score” aggregato**. Nel metodo UBP 2021, ogni emissione, consumo o rifiuto viene pesato in base al suo contributo rispetto ai **limiti ambientali** e agli **obiettivi di sostenibilità della Svizzera**.

Le **categorie di impatto ambientale selezionate** per questo studio sono:

- **Cambiamento climatico (UBP):** emissioni di gas a effetto serra, espresse nel Capitolo 3.1.2 in kg CO<sub>2</sub> eq per facilitare la comparazione con altri studi.
- **Rifiuti non radioattivi (UBP):** rappresentano il principale contributo nel “single score” per tutti gli scenari, e di conseguenza la categoria più critica in relazione agli obiettivi ambientali svizzeri. Questa categoria include effetti legati al volume di materiale smaltito in discarica, al contenuto di carbonio organico (es. bitume).
- **Risorse energetiche (UBP):** consumo di energia fossile non rinnovabile, incluso il bitume e i combustibili impiegati nei processi.
- **Contaminanti in aria e particolato (UBP):** emissioni atmosferiche dannose per la salute e l’ambiente (es. PM10, NO<sub>x</sub>, VOC).

Le altre categorie d’impatto incluse nel metodo UBP 2021 non sono state analizzate in quanto contribuiscono in maniera trascurabile (< 1%) al “single score”, come verrà mostrato nel Capitolo 3.1.3.

A differenza dei metodi LCA internazionali (es. ReCiPe, ILCD), il metodo UBP si basa su **dati e soglie specifiche per la Svizzera**, offrendo una visione più rilevante a livello locale e facilitando l’allineamento con le politiche ambientali nazionali.

## 2.5. Limitazioni dello studio

Lo studio si basa su una combinazione di **dati primari** e **fonti secondarie**. In particolare, sono stati raccolti **dati primari** per le fasi del ciclo di vita ritenute più rilevanti dal punto di vista ambientale, ovvero:

- **l’estrazione dei materiali,**

- la **produzione dei conglomerati bituminosi**,
- e le **attività di riciclo**.

Per le restanti fasi (es. trasporto dei materiali, costruzione del tratto stradale, fresatura, fase d'uso), lo studio si è basato su **dati da letteratura** o su **ipotesi modellate secondo le migliori pratiche LCA** e fonti riconosciute.

Sebbene questa combinazione consenta di ottenere una stima affidabile degli impatti ambientali, **alcune incertezze permangono** soprattutto in relazione alla **frequenza e modalità degli interventi di manutenzione per lo scenario ad integrazione di RA maggiorata**.

Per questo motivo, lo studio include **analisi di sensitività** per valutare l'influenza di un aumento dei cicli di manutenzione sui risultati di Cambiamento Climatico di questo scenario.

## 3. Analisi effettuate e risultati

### 3.1. Panoramica dei risultati

#### 3.1.1. Descrizione dell'analisi

La valutazione ha preso in esame tre scenari alternativi di pavimentazione bituminosa, differenziati in base alla percentuale di materiale riciclato (RA) impiegato negli strati funzionali (usura e portante). Lo studio ha modellato l'intero ciclo di vita di un tratto stradale di 100 metri con una durata utile di 40 anni, includendo la fase di costruzione iniziale, i cicli di manutenzione e la gestione a fine vita.

In tutti gli scenari si assume una **ricostruzione completa dello strato interessato** ad ogni intervento di manutenzione, con **rimozione e sostituzione integrale** (fresatura e nuova posa). L'analisi considera che la **frequenza degli interventi sia identica** in tutti gli scenari, salvo un caso di sensitività in cui si ipotizza un deterioramento precoce nello scenario con RA maggiorato.

In assenza di dati di mercato più specifici, si è assunto che la **percentuale di materiale effettivamente riciclato a fine vita coincida con la percentuale di RA integrata nel nuovo ciclo produttivo**, per ciascuno degli scenari analizzati. Inoltre, **al termine dei 40 anni**, che rappresentano la durata standard di riferimento per la vita utile di un tratto stradale, si è ipotizzato che **l'intera pavimentazione (strato d'usura e portante) venga avviata a smaltimento in discarica**.

Il materiale RA è stato trattato come **privo di carico ambientale (burden free)** al momento del suo ingresso nel ciclo attuale, in linea con l’approccio metodologico “cut-off”.

La Tabella 1 sintetizza le principali caratteristiche dei tre scenari:

*Tabella 1 – Caratteristiche dei sistemi analizzati*

<b>Parametro</b>	<b>Assenza di RA</b>	<b>Integrazione RA</b>	<b>Integrazione RA Maggiorata</b>
<b>RA strato d’usura</b>	0%	0%	70%
<b>RA strato portante</b>	0%	60%	100%
<b>Cicli manutenzione (usura / portante)</b>	3 / 1	3 / 1	3 / 1 (fino a 5/2 per analisi di sensitività)
<b>Quantità materiali trattati</b>	43 t usura + 115 t portante	43 t usura + 115 t portante	65 t usura + 115 t portante
<b>Fine vita – % in discarica</b>	100%	100% usura, 40% portante	30% usura, 0% portante
<b>Fine vita – % riciclo</b>	0%	60% portante	70% usura, 100% portante
<b>Impronta climatica (kg CO<sub>2</sub> eq)</b>	37'239	28'428 (-24%)	18'028 (-52%)
<b>Rifiuti non radioattivi (UBP)</b>	289'004	239'313 (-17%)	170'611 (-41%)
<b>Risorse energetiche (UBP)</b>	12'914	9'542 (-26%)	5'647 (-57%)
<b>Contaminanti aria &amp; particolato (UBP)</b>	11'868	8'851 (-25%)	5'255 (-56%)

### 3.1.2. Cambiamento climatico

L’indicatore di cambiamento climatico è stato espresso in **kg di CO<sub>2</sub> equivalente (kg CO<sub>2</sub> eq)**, semplicemente dividendo il risultato in UBP per 1000 (dato che 1 UBP = 1 g CO<sub>2</sub> eq)<sup>1</sup>.

Come mostrato nel **grafico in Figura 1**, l'impatto climatico si riduce significativamente con l'aumentare del contenuto di RA nei due strati funzionali:

- Scenario in assenza di RA: **37'239 kg CO<sub>2</sub> eq per unità funzionale (UF)**
- Scenario RA tradizionale: **28'428 kg CO<sub>2</sub> eq (-24%) per UF**
- Scenario RA maggiorata: **18'028 kg CO<sub>2</sub> eq (ulteriore -37%) per UF**

Il contributo principale alle emissioni proviene dalle **fasi di estrazione e produzione dei materiali vergini**, in particolare nello strato di usura, dove l'assenza di RA è più marcata. Le emissioni legate al **riciclo** risultano invece trascurabili rispetto a quelle associate allo **smaltimento in discarica**.

Infine, si evidenzia che **costruzione e fresatura** hanno un peso marginale nel bilancio complessivo. Il trattamento del RA come materiale **"burden free"** consente di contabilizzare i benefici ambientali nella fase iniziale del ciclo di vita, secondo l'approccio cut-off adottato.

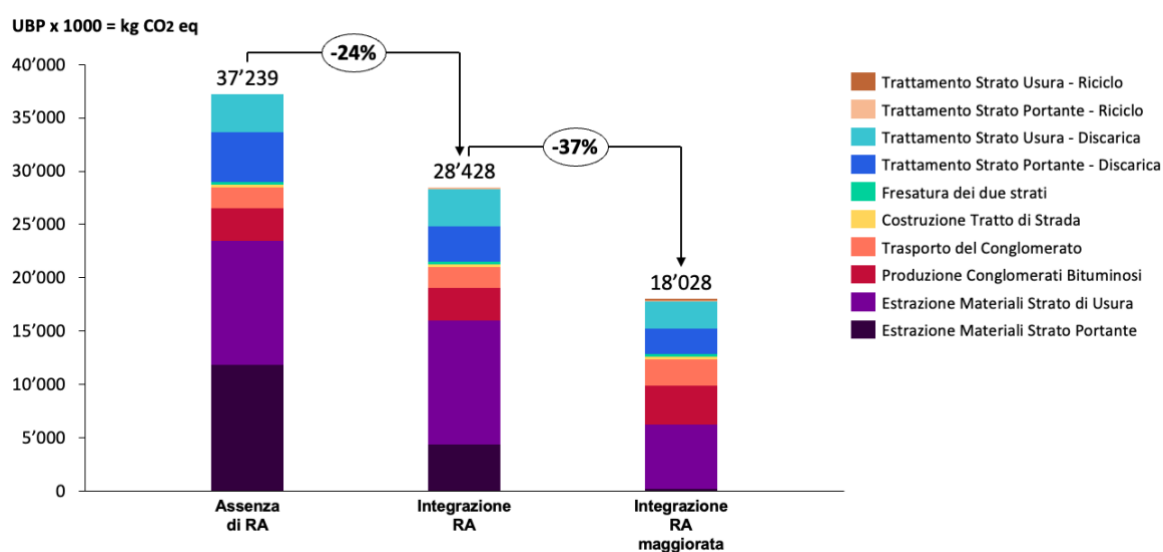


Figura 1 – Risultati dell'analisi per tutti e tre gli scenari, l'indicatore Cambiamento Climatico e l'unità funzionale definita.

### 3.1.3. Punteggio ambientale aggregato (UBP totale)

Il metodo UBP 2021 consente di aggregare tutti gli impatti ambientali in un **punteggio unico** espresso in **punti di impatto ambientale (UBP)**. Questo approccio è particolarmente utile quando, come in questo caso, le diverse categorie presentano ordini di grandezza molto differenti tra loro.

Il **punteggio totale UBP** per ogni scenario, riportato nel **grafico in Figura 2**, conferma i benefici ambientali complessivi derivanti dall'integrazione di materiale RA:

- Scenario in assenza di RA: **364'811 UBP/UF**
- Scenario RA tradizionale: **296'512 UBP/UF (-19%)**
- Scenario RA maggiorata: **205'097 UBP/UF (ulteriore -31%)**

La categoria dominante, in termini di contributo al punteggio totale, è quella dei **rifiuti non radioattivi**, che rappresenta tra **l'80% e l'85% del totale** a seconda dello scenario. Seguono, in ordine decrescente, **cambiamento climatico**, le **risorse energetiche**, i **contaminanti atmosferici**.

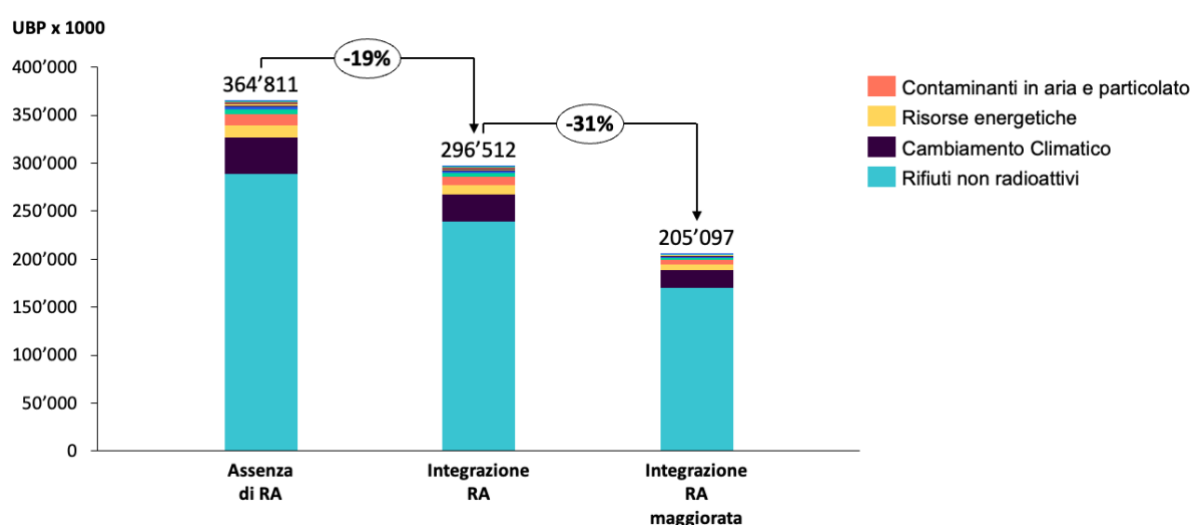


Figura 2 - Risultati per unità funzionale aggregati in un "single score" per tutte le categorie d'impatto considerate dal metodo UBP 2021.

In Figura 2, la legenda mostra solo le categorie d'impatto ambientale considerate in questo studio. Le rimanenti categorie contribuiscono al "single score" per meno dell'1% e comprendono:

- Risorse biotiche
- Rifiuti radioattivi a deposito
- Rumore
- Sostanze radioattive in acqua ed aria
- Metalli pesanti e pesticidi nel suolo
- Metalli pesanti ed inquinanti organici in acqua
- Metalli pesanti e sostanze cancerogene in aria
- Degradazione dello strato di ozono
- Uso del suolo
- Risorse minerali

- Risorse idriche
- Rifiuti non radioattivi

#### 3.1.4. Rifiuti, non radioattivi

L'indicatore relativo ai **rifiuti non radioattivi**, espresso in **punti di impatto ambientale (UBP)**, rappresenta la **categoria di impatto dominante** in tutti gli scenari analizzati, contribuendo fino all'**85% del punteggio ambientale complessivo**.

Questo riflette la particolare rilevanza che la gestione dei materiali a fine vita riveste nel contesto ambientale svizzero, dove il conferimento in discarica è considerato altamente impattante rispetto agli obiettivi nazionali.

Come evidenziato nel **grafico in Figura 3**, l'impatto totale in questa categoria si riduce sensibilmente al crescere dell'integrazione di RA, passando da:

- **289'004 UBP/UF** nello scenario in assenza di RA,
- a **239'313 UBP/UF** nello scenario RA tradizionale (-17%),
- fino a **170'611 UBP/UF** nello scenario RA maggiorata (ulteriore -29%).

I contributi principali all'indicatore derivano da tre fattori:

1. la quantità di **carbonio organico depositato in discarica** all'interno dell'asfalto (assunto daecoinvent come il **5% della massa totale di asfalto**),
2. il **carbonio organico che percola dalla discarica a corsi d'acqua** in un'ottica temporale superiore a 100 anni (assunto come l'intero contenuto di carbonio organico nell'asfalto),
3. **massa e volume occupati dall'asfalto in discarica**.

Come osservato anche per il cambiamento climatico, la **sostituzione di materiale vergine con RA**, unita al **maggior riciclo a fine vita**, determina una riduzione netta dell'impatto.

Al contrario, lo scenario senza RA, che prevede il conferimento in discarica del 100% dei materiali a ogni manutenzione, risulta essere il più impattante.

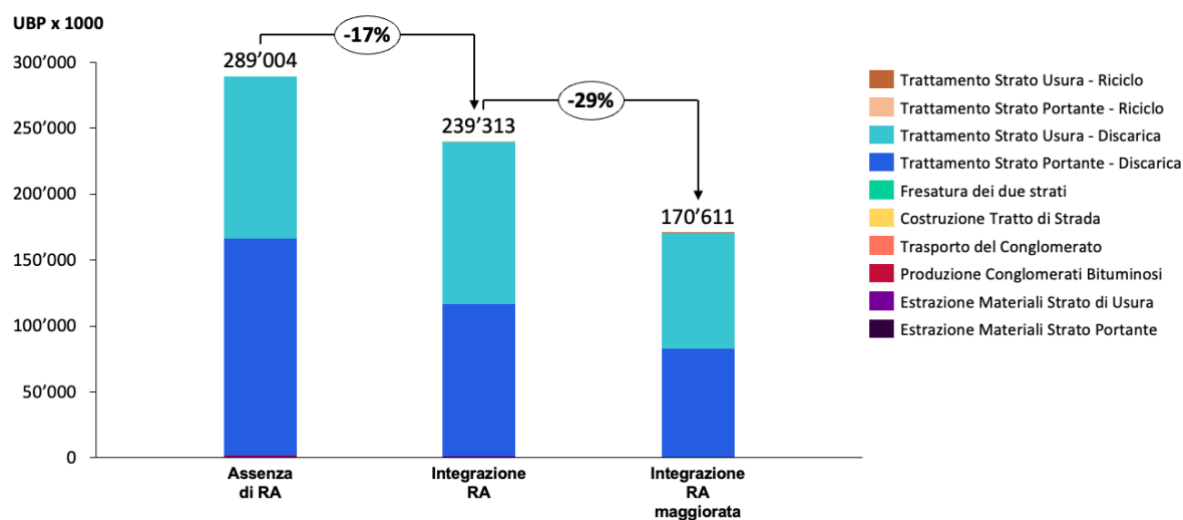


Figura 3 – Risultati per unità funzionale e l'indicatore Rifiuti, non-radioattivi per i tre scenari.

### 3.1.5. Risorse Energetiche

L'indicatore “**risorse energetiche**” misura il **consumo di energia non rinnovabile** durante il ciclo di vita, con riferimento a fonti fossili come petrolio, gas naturale e carbone. I risultati sono espressi in punti di impatto ambientale (UBP) secondo la metodologia **UBP 2021**<sup>1</sup> elaborata dal BAFU, che **converte il contenuto energetico in un punteggio ambientale proporzionale all'impatto**.

Il **fattore di conversione** adottato dalla metodologia svizzera è pari a:

**1 MJ di energia non rinnovabile = 8.3 UBP**

Questo coefficiente si basa sugli obiettivi a lungo termine della “**società a 2000 watt**”<sup>3</sup>, confrontando il consumo energetico attuale con un livello considerato sostenibile a livello nazionale. In questo modo, il metodo penalizza il ricorso a fonti fossili non rinnovabili, evidenziandone l'incompatibilità con i target climatici e di transizione energetica della Svizzera.

Nel contesto dello studio, il **consumo di risorse energetiche si riduce progressivamente con l'incremento della quota di RA**, come illustrato nel grafico in **Figura 4**:

- Scenario in assenza di RA: **12'914 UBP/UF**
- Scenario RA tradizionale: **9'542 UBP/UF** (-26%)
- Scenario RA maggiorata: **5'647 UBP/UF** (ulteriore -41%)

Il contributo principale proviene dalla **produzione di bitume vergine**, responsabile fino all'80% del punteggio nello scenario che prevede unicamente materiali vergini. L'impiego

di RA consente di evitare una parte significativa di questi consumi, riducendo in modo consistente l'impatto energetico complessivo.

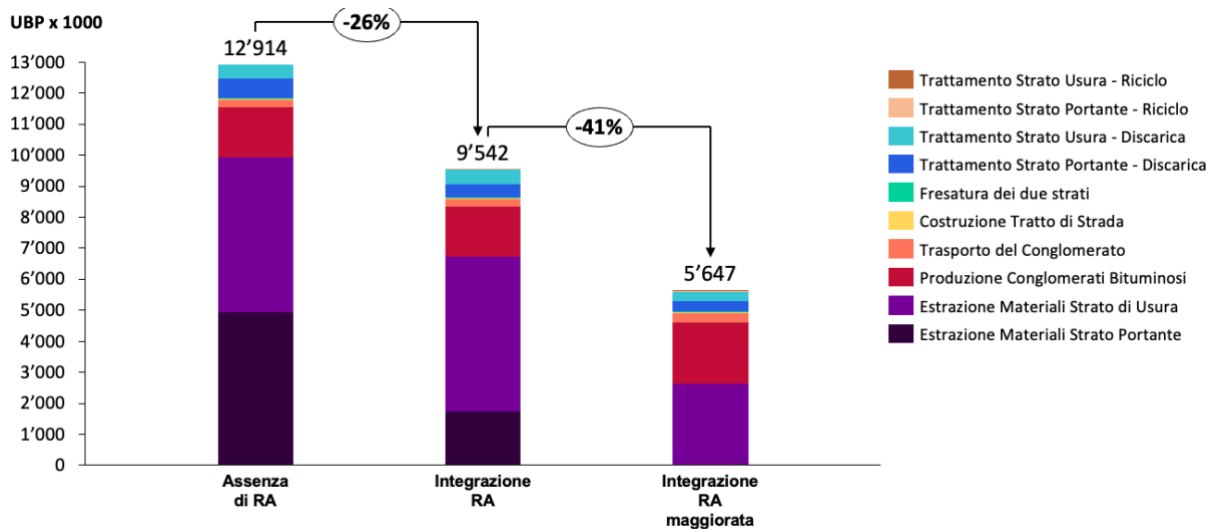


Figura 4 – Risultati per unità funzionale e l'indicatore Risorse Energetiche per i tre scenari.

### 3.1.6. Contaminanti in aria e particolato

L'indicatore “**Contaminanti in aria e particolato**” valuta l'impatto ambientale derivante dall'emissione in atmosfera di sostanze nocive per la salute umana e per gli ecosistemi, come polveri sottili, ossidi di azoto e composti organici volatili. Il calcolo è stato effettuato in **punti di impatto ambientale (UBP)** secondo il metodo UBP 2021, che assegna a ciascuna sostanza un **fattore di impatto specifico**, senza conversioni in equivalenti.

Ad esempio, il metodo attribuisce<sup>1</sup>:

- **160 UBP per grammo di PM10 o PM2.5,**
- **33 UBP/g per NO<sub>x</sub>,**
- **12 UBP/g per composti organici volatili non metanici (NMVOC).**

Come riportato nel **grafico in Figura 5**, il punteggio totale decresce sensibilmente nei due scenari alternativi:

- Scenario in assenza di RA: **11'868 UBP/UF**
- Scenario RA tradizionale: **8'851 UBP/UF** (-25%)
- Scenario RA maggiorata: **5'255 UBP/UF** (ulteriore -41%)

I principali responsabili dell'impatto sono le attività legate all'**estrazione degli aggregati**, in particolare le **operazioni di frantumazione** presso le cave, modellate sulla base di dataset svizzeri riferiti al calcare. Anche in questa categoria, l'**incremento della quota di RA** e la conseguente **riduzione della domanda di materiale vergine** contribuiscono direttamente alla diminuzione delle emissioni in atmosfera.

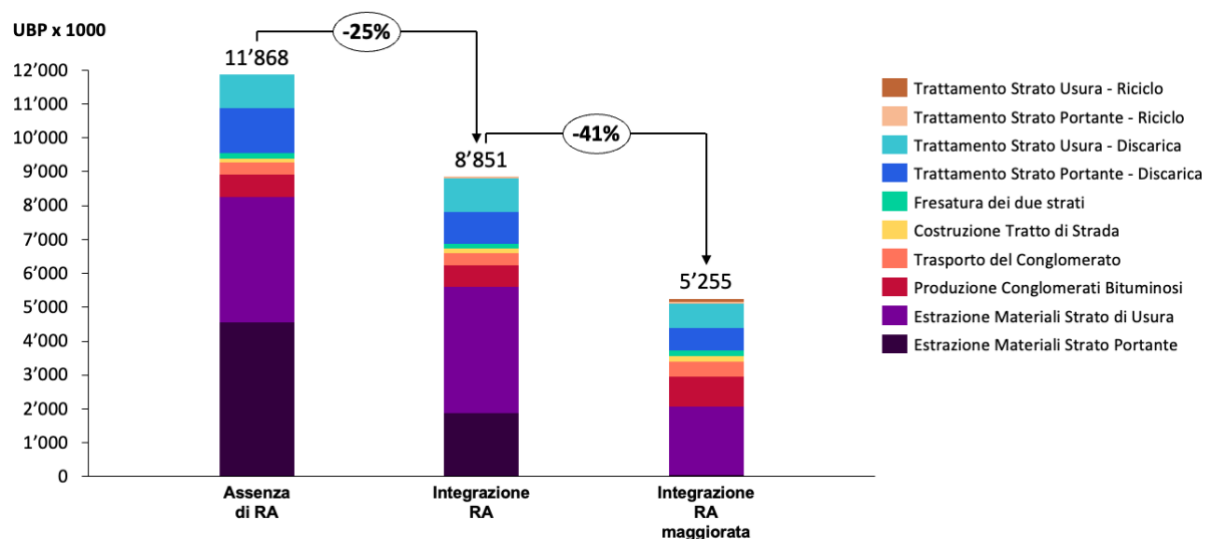


Figura 5 – Risultati per unità funzionale e l'indicatore Contaminanti in aria e particolato per i tre scenari.

## 4. Analisi di sensitività

### 4.1. Manutenzioni aggiuntive per lo Scenario ad Integrazione di RA maggiorata

Un'analisi di sensitività è stata condotta per valutare la **robustezza ambientale dello scenario RA maggiorata** nel caso in cui si rendessero necessari **interventi manutentivi più frequenti** rispetto allo scenario base. Questo esercizio ha carattere esplorativo e si basa su **ipotesi conservative**, in assenza di dati empirici sulla durabilità dei materiali ad alto contenuto di RA.

Sono stati modellati quattro casi alternativi rispetto alla configurazione base dello scenario RA maggiorata (3 cicli per lo strato d'usura, 1 per il portante):

Tabella 2: Risultati per gli scenari alternativi modellati per l'analisi di sensitività – Cambiamento Climatico

Scenario	Cicli usura (SU)	Cicli portante (SP)	Impatto climatico (kg CO <sub>2</sub> eq)
Assenza di RA	3	1	37'239
Integrazione di RA tradizionale	3	1	28'428
RA maggiorata – base	3	1	18'028

Scenario	Cicli usura (SU)	Cicli portante (SP)	Impatto climatico (kg CO <sub>2</sub> eq)
RA maggiorata – caso 1	4	1	20'908 (+16% rispetto alla base)
RA maggiorata – caso 2	3	2	19'831 (+10%)
RA maggiorata – caso 3	4	2	22'711 (+26%)
RA maggiorata – caso 4 (estremo)	5	2	25'590 (+42%)

Come mostrato in **Figura 6**, l'aumento della frequenza di manutenzione per **entrambi gli strati** comporta un incremento dell'impronta climatica, ma **lo scenario RA maggiorata continua a offrire benefici ambientali netti** rispetto agli altri due scenari.

Inoltre, sebbene non sia incluso in questo documento, **il trend osservato** per la categoria del Cambiamento Climatico **è il medesimo per le altre categorie di impatto analizzate**.

L'analisi conferma quindi la **robustezza ambientale dello scenario RA maggiorata**, anche in condizioni conservative. Tuttavia, si sottolinea l'importanza di validare in futuro queste ipotesi con **dati tecnici sulle prestazioni meccaniche e la durabilità** dei materiali ad alto contenuto di RA.

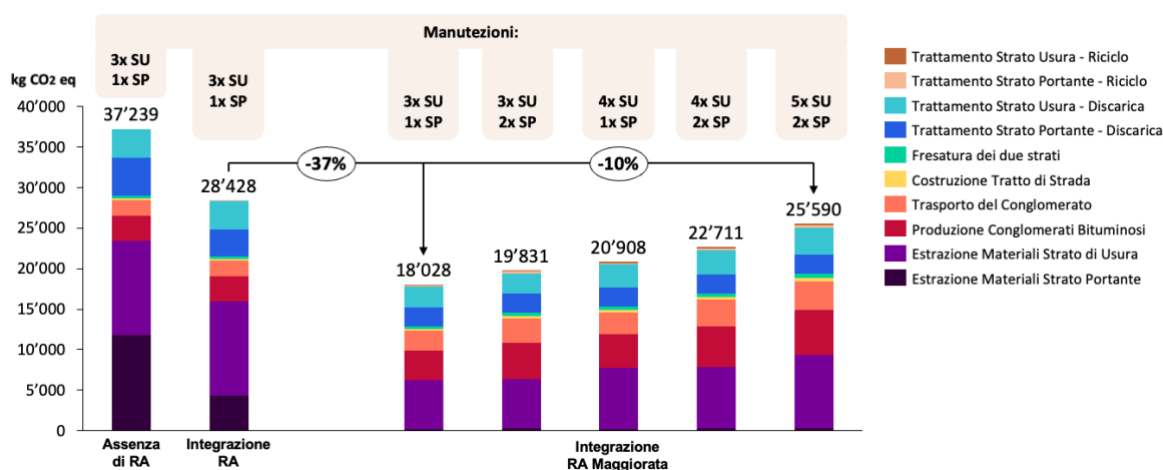


Figura 6 – Analisi di sensitività per la categoria Cambiamento Climatico, dove viene variato il numero di manutenzioni per uno o entrambi gli strati (usura e portante) nello scenario ad integrazione di RA maggiorata.

## 5. Conclusioni

Lo studio ha valutato gli impatti ambientali lungo il ciclo di vita di tre scenari alternativi di pavimentazione bituminosa, caratterizzati da diverse percentuali di utilizzo di materiale riciclato (RA) negli strati d'usura e portante.

I risultati ottenuti, espressi secondo la metodologia **UBP 2021**<sup>1</sup> sviluppata dal BAFU, mostrano una **riduzione significativa degli impatti ambientali** in tutti gli indicatori analizzati al crescere dell'integrazione di RA.

In particolare:

- Lo **scenario con RA maggiorata** (70% RA nello strato d'usura, 100% nel portante) presenta le **migliori performance ambientali**, con una **riduzione del 37% dell'impronta climatica rispetto allo scenario con integrazione di RA tradizionale**.
- La **categoria Rifiuti non radioattivi** è quella con il maggior peso nel punteggio aggregato (fino all'85%), a conferma della centralità della **gestione a fine vita** nei processi stradali.
- Gli **impatti legati all'estrazione e alla produzione di bitume e aggregati vergini** sono dominanti negli scenari meno circolari.
- Le fasi di **costruzione, trasporto e fresatura** hanno un peso marginale rispetto alle altre.

L'**analisi di sensitività** conferma che, anche in scenari peggiorativi con manutenzioni aggiuntive, lo scenario RA maggiorata mantiene un **vantaggio netto** rispetto alle configurazioni tradizionali. Solo in caso di **incremento marcato di interventi (fino a 5 cicli di usura e 2 di portante)**, l'impatto climatico si avvicina a quello dello scenario RA semplice (-10%), ma resta comunque **inferiore a quello che prevede solo materiali vergini del 31%**.

Nel complesso, l'integrazione di RA – in particolare se estesa anche allo strato di usura – emerge come **una strategia efficace di mitigazione degli impatti ambientali**, coerente con gli obiettivi di economia circolare e gestione sostenibile delle infrastrutture promossi a livello cantonale e federale.

## 6. Bibliografia

1. [Swiss Eco-Factors 2021 according to the Ecological Scarcity Method](#)
2. [ecoinvent](#)
3. [Società a 200 watt - svizzeraenergia](#)