

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI MEDICINA E CHIRURGIA

Corso di Laurea Magistrale in Scienze delle professioni sanitarie
Tecniche diagnostiche

Sostenibilità ambientale in Radiologia Interventistica: validazione del protocollo pilota *G.L.O.B.E*.

(Green Lung Optimization in Biopsy Execution)

Relatrice:

Prof.ssa Chiara Floridi

Tesi di Laurea di:

Davide Matteagi

Correlatore:

Prof. Roberto Candelari

A.A. 2025/2026

Indice

STUDIO COMPILATIVO

INTRODUZIONE ……...1

Capitolo 1: LA VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE IN RADIOLOGIA 3

1.1 Il calcolo della CO2 Equivalente e il Greenhouse Gas Protocol .. 3

1.2 Life Cycle Assessment (LCA) in Radiologia 5

Capitolo 2: **L'INTENSITA' ENERGETICA IN RADIOLOGIA DIAGNOSTICA E INTEVENTISTICA**……6

2.1 I Consumi delle Apparecchiature Tomografiche: Il Problema dell'Idle State 6

2.2 Il Microclima di Sala e i Sistemi HVAC 9

2.3 Le Workstation di Refertazione: Un Consumo Silenzioso……..10

Capitolo 3: LA GENERAZIONE E LA GESTIONE DEI RIFIUTI IN RADIOLOGIA……...12

3.1 Il peso del packaging e l'abuso della plastica monouso……..12

3.2 Il fenomeno dell' "Overage" e l'inefficienza dell'inventario…...13

3.3 L'ergonomia di sala e la mis-segregazione dei rifiuti…….14

3.4 Dispositivi di Protezione Individuale (DPI): Monouso vs Riutilizzabile…….15

Capitolo 4: **INQUINAMENTO DELLE ACQUE E GESTIONE DEI MEZZI DI CONTRASTO**……16

4.1 L'impatto eco-tossicologico dei mezzi di contrasto……16

4.2 Strategie di riduzione: ottimizzazione tecnologica e "Source Control" ……17

Capitolo 5: **"DIGITAL TEMPERANCE", INTELLIGENZA ARTIFICIALE E IL CARICO DEI DATI** ……18

5.1 La "CO2 invisibile" dei Data Center……...18

5.2 Soluzioni pratiche: "Digital Temperance" e Storage a Livelli ...18

5.3 L'Intelligenza Artificiale in Radiologia: Un'arma a doppio taglio ……..19

Capitolo 6: COSTI, BARRIERE E PROSPETTIVE FUTURE……20

6.1 Le barriere al cambiamento ……20

6.2 Sostenibilità economica e accettazione da parte del paziente….21

STUDIO SPERIMENTALE

Capitolo 7. OBIETTIVO DELLO STUDIO……..22

Capitolo 8. MATERIALI E METODI……24

8.1 Popolazione……24

8.2 Protocollo *GLOBE*…….25

8.3 Parametri tecnici……28

8.4 Outcome clinici……..29

9. RISULTATI……31

9.1 Consumo energetico e archiviazione dati……...33

9.2 Consumo di materiali consumabili…….36

9.3 Outcome clinici e procedurali…….37

10. DISCUSSIONE……38

11. CONCLUSIONI……42

12. BIBLIOGRAFIA……...44

Introduzione:

Il cambiamento climatico e il progressivo deterioramento ambientale rappresentano, secondo le Nazioni Unite, la sfida cruciale e più complessa della nostra era. Negli ultimi anni, la comunità scientifica internazionale ha ampiamente documentato il legame diretto e bidirezionale esistente tra la salute del pianeta e quella della popolazione: l'inquinamento atmosferico, idrico e del suolo si traduce in un incremento esponenziale di patologie cardiovascolari, respiratorie e sistemiche, gravando ulteriormente sui sistemi sanitari mondiali.

In questo scenario si inserisce un paradosso fondamentale: il settore sanitario, il cui obiettivo primario è la cura e la salvaguardia della vita umana, è al contempo uno dei principali motori del degrado ambientale, essendo responsabile di circa il **5% delle emissioni globali di gas serra**. All'interno dell'ecosistema ospedaliero, i reparti di area radiologica — e in particolar modo la **Radiologia Interventistica (IR)** — si collocano tra i maggiori responsabili di questo impatto ecologico. La complessità delle procedure mininvasive, l'impiego di apparecchiature di imaging ad altissima tecnologia e la dipendenza da dispositivi medici monouso sterili generano un'impronta carbonica massiccia: è stato stimato, infatti, che una singola procedura interventistica possa sprigionare un quantitativo di emissioni compreso **tra i 77 e i 243 kg di CO2 equivalente**. **[1] [12]**

Diventa quindi imperativo etico, clinico e gestionale analizzare i fattori critici che determinano questo impatto per poter implementare strategie di mitigazione efficaci, sintetizzabili nel principio *"Healing the patient, preserving the planet"* (Curare il paziente, preservare il pianeta).

Questo lavoro di tesi si propone di esaminare nel dettaglio le principali fonti di impatto ambientale in Radiologia Interventistica e le relative soluzioni di sostenibilità, proponendo, tramite una sperimentazione scientifica sul campo,

un'applicazione pratica per la salvaguardia ecologica del reparto. In tale percorso, verrà posta particolare enfasi sull'importanza dell'organizzazione e della gestione strategica del gruppo di lavoro: la transizione verso una radiologia ecosostenibile richiede infatti la costruzione di una solida consapevolezza e la condivisione delle conoscenze tra tutti i professionisti coinvolti, un **contesto in cui il Tecnico Sanitario di Radiologia Medica (TSRM) assume un ruolo centrale** e propulsivo nel guidare l'équipe multidisciplinare verso l'ottimizzazione dei processi. **[13] [14]**

CAPITOLO 1: VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE IN RADIOLOGIA

1.1 Il calcolo della CO2 Equivalente e il Greenhouse Gas Protocol

Per poter attuare strategie di mitigazione efficaci, è essenziale adottare metriche standardizzate che permettano di quantificare e confrontare l'impatto delle diverse attività.

L'**unità di misura** universalmente riconosciuta per la valutazione dell'impatto ambientale di una determinata attività è la CO2 equivalente (CO2e), un parametro che converte l'impatto sul riscaldamento globale di vari gas serra (come il metano o i gas anestetici fluorurati) in una quantità equivalente di anidride carbonica, fornendo così una visione completa e standardizzata del costo ecologico.

Il **quadro di riferimento internazionale** più autorevole per la categorizzazione di queste emissioni nell'ambito di una Azienda Sanitaria è il *Greenhouse Gas (GHG) Protocol*, il quale suddivide le emissioni prodotte da un'azienda sanitaria in tre ambiti (Scope) distinti: **[2]**

- **Ambito 1 (Emissioni Dirette - 17% del totale):** Include tutte le emissioni provenienti da fonti di diretta proprietà o sotto il controllo diretto della struttura ospedaliera. Rientrano in questa categoria i gas di scarico della flotta veicolare aziendale, le emissioni degli impianti di riscaldamento interni e il rilascio diretto di gas anestetici volatili (come il desflurano o il sevoflurano) impiegati durante le procedure chirurgiche e interventistiche.
- **Ambito 2 (Emissioni Indirette da Energia - 12% del totale):** Riguarda le emissioni indirette derivanti dalla generazione dell'energia acquistata dall'ospedale. Questo ambito comprende l'energia elettrica necessaria per alimentare l'illuminazione, i sistemi

di raffreddamento e, soprattutto, i grandi macchinari radiologici come la Tomografia Computerizzata (TC) e la Risonanza Magnetica (RM).

- **Ambito 3 (Altre Emissioni Indirette - 71% del totale):** Costituisce la frazione nettamente maggioritaria ed è la più complessa da tracciare. Include tutte le emissioni che si verificano lungo l'intera catena del valore (*supply chain*) dell'ospedale: l'estrazione delle materie prime, la produzione e il trasporto dei dispositivi medici monouso e dei farmaci, la gestione e lo smaltimento dei rifiuti ospedalieri e gli spostamenti legati ai viaggi dei pazienti e del personale.

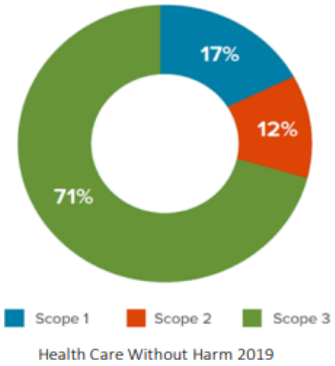


Figura 1. *Suddivisione percentuale delle emissioni di gas serra del settore sanitario secondo gli ambiti (Scope 1, 2 e 3) definiti dal GHG Protocol (Fonte: Health Care Without Harm, 2019).*

1.2 Life Cycle Assessment (LCA) in Radiologia

L'impatto ambientale di un esame radiologico e ancor di più di una procedura di radiologia interventistica non deriva esclusivamente dall'energia elettrica consumata dal tomografo durante la scansione del paziente, ma è la somma di una moltitudine di fattori. Per ottenere una valutazione accurata, la letteratura scientifica si avvale del *Life Cycle Assessment* (LCA), una metodologia analitica che quantifica l'impronta ecologica di un prodotto o servizio lungo tutto il suo ciclo di vita: dall'estrazione delle materie prime, alla fase di manifattura, alla logistica di distribuzione, fino all'utilizzo clinico e al trattamento del rifiuto residuo. **[5]**

Un'evoluzione di questo concetto, particolarmente utile in ambito medico, è il *Process Life Cycle Assessment* (P-LCA), che valuta l'impatto ambientale generato dai processi legati a specifiche decisioni cliniche. Applicando il P-LCA a un dipartimento di diagnostica per immagini, è possibile non solo misurare i consumi diretti delle apparecchiature, ma anche i consumi accessori spesso trascurati, come quelli legati all'immagazzinamento dei dati nei server (PACS), ai sistemi di raffreddamento ad acqua per le RM e al lavaggio della teleria. **[17]**

CAPITOLO 2: INTENSITÀ ENERGETICA IN RADIOLOGIA DIAGNOSTICA E INTERVENTISTICA

2.1 I Consumi delle Apparecchiature Tomografiche: Il Problema dell'Idle State

La Tomografia Computerizzata rappresenta uno degli esami più richiesti e, di conseguenza, uno dei maggiori elementi radiologici di consumo energetico. Un'indagine accurata condotta in Italia ha stimato che il consumo totale di un dipartimento di radiologia si attesta intorno agli 877.5 kWh giornalieri, in gran parte imputabili ai tomografi e ai sistemi RM.

Scendendo nel dettaglio della singola apparecchiatura, un tomografo TC presenta un consumo energetico che oscilla tra i 20.000 e i 35.000 kWh all'anno. Per comprendere la portata di tale assorbimento, basti pensare che l'energia impiegata durante le scansioni di una singola TC in un anno è paragonabile al consumo elettrico complessivo di una famiglia composta da 4 persone nello stesso arco di tempo. **[10]** L'impronta carbonica derivante dall'espletamento di un singolo esame TC è pari a circa 9.2 kg di CO2e, un quantitativo equivalente alle emissioni generate da un'automobile che percorre circa 76 chilometri. A titolo comparativo, un esame ecografico genera solamente circa 0.5 kg di CO2e, e una radiografia del torace tra 0.53 e 2 kg di CO2e. La Risonanza Magnetica, invece, a causa della necessità di mantenere i magneti superconduttori costantemente a temperature criogeniche, emette circa 17.5 kg di CO2e per esame. **[1] [18]**

Tuttavia, il dato più critico relativo all'inefficienza energetica della Tomografia Computerizzata e degli angiografi interventistici riguarda lo **stato di inattività**, definito ***Idle State***. L' *Idle State* rappresenta il tempo in cui la macchina è accesa, alimentata e pronta a eseguire l'esame, ma non sta attivamente irradiando il paziente. La letteratura evidenzia che ben due terzi

(66%) del consumo energetico globale di uno scanner TC avvengono proprio durante questa fase non produttiva. Altri studi spingono questa stima ancora più in alto, calcolando che fino al 91% dell'energia venga consumata in modalità *Idle* **[16]**. Questo implica che l'energia dissipata nello stato di inattività annuale è pari a circa quattro volte il consumo generato durante le scansioni effettive. Similmente, nei sistemi di imaging per la radiologia interventistica e la cardiologia, il tempo di inattività rappresenta oltre il 90% dell'utilizzo temporale totale e consuma la netta maggioranza dell'energia. **[5] [15] [13]**

Tabella 1. Impronta carbonica equivalente per metodica di imaging diagnostico.

Metodica / Ambito Radiologico	Consumo Energetico Medio Giornaliero / Annuo	Impronta Carbonica Stimata per Esame ($kgCO_2e$)	Impatto Comparativo / Equivalenza Ecologica
Ecografia (US)	8.9 kWh / giorno	**~ 0.5 kg CO_2e** per esame	Metodica a minor impatto energetico e senza emissioni dirette
Radiografia del Torace (RX)	18.4 kWh / giorno	**0.53 - 2.0 kg CO_2e** per esame	Consumo ridotto rispetto alle grandi macchine Tomografiche/RM
Tomografia Computerizzata (TC)	58.3 kWh / giorno (20.000 - 35.000 kWh/anno)	**9.2 kg CO_2e** per esame	Equivalente a un'autovettura a combustione che percorre ~ **76 km**. Consumo annuo pari a **5 famiglie di 4 persone**.
Risonanza Magnetica (RM)	214.6 kWh / giorno *(fino a 290.7 kWh/giorno)*	**17.5 kg CO_2e** per esame	Elevato fabbisogno energetico continuo per il raffreddamento del magnete
RADIOLOGIA INTERVENTISTICA (IR)	Elevata potenza di picco + **49% consumi imputabili al sistema HVAC di sala**	**77.0 - 243.0 kg CO_2e** per singola procedura	La procedura con il **massimo impatto ecologico**: 243 kg CO_2e equivalgono a **9 viaggi in auto a benzina da Bristol a Londra**.

2.2 Il Microclima di Sala e i Sistemi HVAC

Le sale di Radiologia Interventistica, assimilabili per requisiti strutturali alle sale operatorie, necessitano di stretti parametri di controllo termo-igrometrico e di sterilità dell'aria. Tali requisiti sono garantiti dai sistemi HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning), i quali rappresentano in assoluto la maggiore fonte di emissioni di gas serra all'interno delle strutture ospedaliere. Nei complessi sanitari, questi impianti consumano energia per oltre il 90% della giornata al fine di mantenere i requisiti ambientali costanti. **[6]**

È stato dimostrato che circa il 45% dei consumi elettrici attribuiti al funzionamento di una sala TC è in realtà legato ai sistemi HVAC che devono raffreddare l'aria riscaldata dai macchinari stessi. **[1]**

Anche quando la TC o l'angiografo sono inattivi, il sistema di climatizzazione continua a funzionare a pieno regime. Un'analisi condotta in una sala di Radiologia Interventistica ha rivelato che oltre la metà dell'energia utilizzata dai sistemi HVAC viene generata durante le ore di chiusura (off hours), ovvero in momenti in cui la sala non ospita né pazienti né personale.

Una gestione ottimizzata di tali sistemi offrirebbe margini di risparmio formidabili quotidianamente. Modulando la ventilazione in base all'effettiva occupazione delle sale, è possibile abbattere radicalmente i costi e le emissioni. Un esempio virtuoso è quello fornito dalla *Cleveland Clinic*, che ha ottenuto un risparmio pari a 2 milioni di dollari all'anno semplicemente riducendo il tasso di ricambi d'aria da 20 volumi/ora a 6 volumi/ora nei momenti di inutilizzo delle sale operatorie. **[5] [18]**

2.3 Le Workstation di Refertazione: Un Consumo Silenzioso

Sebbene una singola stazione di refertazione RIS/PACS non richieda la potenza di un tomografo o di una RM, l'impatto cumulativo di decine di terminali ad altissima risoluzione lasciati costantemente accesi 24 ore su 24 costituisce un importante spreco energetico. Il mantenimento di un personal computer costantemente attivo genera circa 1.471 kg di CO2 all'anno per singolo dispositivo.

Ricerche recenti hanno evidenziato abitudini operative ampiamente migliorabili. Ad esempio, uno studio di McCarthy et al. **[4]** condotto in un dipartimento radiologico universitario ha rilevato che 29 computer desktop su 43 e ben 25 workstation di refertazione PACS su 27 venivano lasciati inutilmente alimentati al termine dell'orario di lavoro clinico. Un altro studio di Hainc et al. **[9]** su 36 stazioni di refertazione ha dimostrato che il 45% del consumo energetico può essere eliminato semplicemente riducendo il tempo di attesa prima dello spegnimento automatico da quattro ore a una singola ora di inattività.

Spegnere sistematicamente le workstation al termine di un turno lavorativo standard di otto ore consentirebbe a un dipartimento di radiologia di risparmiare oltre 83.866 kWh di elettricità, traducendosi in un risparmio economico di 9.225 dollari all'anno. Dal punto di vista ecologico, tale riduzione equivarrebbe a rimuovere le emissioni prodotte da 11.6 automobili in un intero anno. Inoltre, lo spegnimento dei monitor e dei computer comporta un'ulteriore riduzione della dissipazione termica all'interno degli studi medici, alleggerendo conseguentemente il carico di lavoro e i consumi dei sistemi di condizionamento (HVAC).

L'implementazione di protocolli di spegnimento automatico delle workstation, attraverso script informatici centralizzati, è una strategia di comprovata efficacia. Lo studio di Walters et al. **[19]** ha dimostrato come

l'impostazione di uno spegnimento automatico su sistemi Windows 10 (con accensione programmata alle 06:00 e spegnimento alle 19:30 nei giorni feriali, mantenendo il blocco totale nei fine settimana) riduca il tempo medio di utilizzo dei terminali da 148 ore settimanali a sole 75.5 ore. Questo dimezzamento dei tempi di attività si è tradotto in un risparmio annuo di 17 MWh e nella riduzione di 3.4 tonnellate di CO2e per singola postazione, corrispondenti a un beneficio finanziario di circa 5.000 sterline all'anno, il tutto senza generare alcun disservizio nel flusso di lavoro clinico quotidiano. **[5] [15]**



Figura 2 e 3. *L'adozione di protocolli di spegnimento automatico per le stazioni di refertazione PACS fuori dall'orario di lavoro rappresenta una delle strategie "low-effort, high-yield" più efficaci per la decarbonizzazione dei dipartimenti radiologici.*

CAPITOLO 3: GENERAZIONE E GESTIONE DEI RIFIUTI IN RADIOLOGIA INTERVENTISTICA

3.1 Il peso del packaging e l'abuso della plastica monouso

La Radiologia Interventistica, per la natura intrinsecamente mininvasiva e sterile delle sue procedure, è un reparto ad altissimo consumo di materiali monouso e imballaggi. L'industria dell'imaging medico produce a livello globale oltre 90.000 tonnellate di rifiuti in plastica, 42.000 tonnellate di packaging e 900 tonnellate di acciaio ogni anno e buona parte di questi numeri provengo da settore radiologico interventistico. A fronte di questi volumi massivi, le percentuali di riciclo rimangono allarmanti: nel Regno Unito, ad esempio, meno del 5% della plastica sanitaria viene effettivamente avviato a processi di recupero e riciclo. [5]

Un'analisi dettagliata condotta da Clements et al. [7] ha esaminato la composizione fisica dei prodotti utilizzati quotidianamente nelle sale angiografiche. Lo studio ha dimostrato che l'imballaggio (necessario per la spedizione e per il mantenimento del doppio strato di sterilità) costituisce ben il 54.8% del peso complessivo dei prodotti di radiologia interventistica. Un dato cruciale emerso dalla medesima ricerca è che il 76% di questo packaging sarebbe costituito da materiali potenzialmente riciclabili, come carta, cartone e plastiche rigide. Ciononostante, la quasi totalità di questi involucri viene attualmente smaltita come rifiuto indifferenziato o, peggio, come rifiuto speciale a causa di procedure di segregazione inefficienti.

Un ostacolo strutturale alla riduzione di questi volumi risiede nel modello di business adottato dalle aziende produttrici. La fornitura di **materiali monouso** risulta economicamente più redditizia per l'industria rispetto alla produzione di dispositivi riutilizzabili, generando una rigidità commerciale che obbliga i professionisti sanitari a gettare presidi che,

tecnicamente, potrebbero essere sterilizzati e riutilizzati in totale sicurezza. **[12]**



Figura 4. *L'imballaggio sterile rappresenta oltre la metà del peso dei presidi utilizzati in Radiologia Interventistica, ponendo urgenti sfide per l'implementazione di pratiche di economia circolare.*

3.2 Il fenomeno dell'"Overage" e l'inefficienza dell'inventario

Ulteriore fonte di spreco, sia economico che ecologico, è legata alle abitudini comportamentali del team di sala. Il fenomeno dell'*overage* si verifica quando i presidi sterili vengono aperti e preparati sul campo operatorio per mera anticipazione delle necessità del medico interventista (approccio *"just in case"*), anziché al momento dell'effettivo bisogno clinico (approccio *"just in time"*).

La letteratura stima che circa il 26% delle forniture sterili monouso aperte durante le procedure chirurgiche e interventistiche rimanga del tutto inutilizzato al termine dell'intervento. Non potendo essere sterilizzato, questo materiale intonso si trasforma in un rifiuto ad altissimo costo. Nelle procedure neuro-interventistiche, ad esempio, lo spreco generato dall'*overage* è stato quantificato in una **perdita economica media di ben 676 euro per singolo caso trattato.**

A questo si aggiunge l'inefficienza nella rotazione dei magazzini di reparto. Dispositivi medici costosi vengono spesso scartati a causa del superamento della data di scadenza. L'adozione rigorosa del metodo FIFO (First In, First Out), affiancata a programmi di conto deposito (*consignment*) e a una comunicazione più efficace tra operatori e personale di supporto, rappresenta una misura correttiva fondamentale per abbattere questo spreco. **[12]**

3.3 L'ergonomia di sala e la mis-segregazione dei rifiuti

La corretta segregazione dei rifiuti è un pilastro della sostenibilità ospedaliera, poiché i flussi di smaltimento presentano costi economici e ambientali radicalmente diversi. Il trattamento dei rifiuti sanitari pericolosi a rischio infettivo (ROT) richiede processi di incenerimento o autolavaggio che costano alle aziende sanitarie dalle 10 alle 20 volte in più rispetto alla gestione dei rifiuti urbani e del riciclo. Sul fronte emissivo, l'incenerimento ad alta temperatura rilascia in atmosfera 1074 kg di CO2e per tonnellata, contro i soli 43 kg di CO2e per tonnellata associati ai processi di riciclaggio, determinando inoltre l'emissione di fumi tossici e metalli pesanti. **[2]**

Nonostante tali divari, gli studi dimostrano che tra il 50% e l'85% dei rifiuti prodotti in sala, i quali dovrebbero essere classificati come rifiuti urbani o riciclabili, viene invece erroneamente smaltito nei bidoni del rischio biologico. **[11]** Le cause di questa errata classificazione spaziano dalla scarsa formazione del personale, al timore di sanzioni, fino alla semplice comodità logistica.

L'ergonomia e il layout della sala angiografica giocano un ruolo determinante in questo processo. Uno studio condotto da Brassil et al. **[3]** ha dimostrato che i rifiuti hanno il 60% di probabilità in più di essere segregati in modo inappropriato se il contenitore dei rifiuti a rischio biologico si trova fisicamente più vicino all'operatore rispetto al contenitore dei rifiuti non a

rischio. Pertanto, posizionare strategicamente il bidone del riciclo a portata di mano durante la fase di apertura dei kit, allontanando temporaneamente quello dei rifiuti infettivi, induce un miglioramento comportamentale immediato e misurabile. [12]

3.4 Dispositivi di Protezione Individuale (DPI): Monouso vs Riutilizzabile

Un dibattito centrale in ambito chirurgico e interventistico riguarda la scelta tra DPI monouso (camici, teli, cuffie in tessuto o non tessuto) e riutilizzabili (cotone o tessuti tecnici lavabili). Il passaggio a prodotti riutilizzabili consente una riduzione dell'impronta carbonica media compresa tra il 38% e il 56%, arrivando in alcune casistiche a un abbattimento delle emissioni di gas serra fino al 66%.

Dal punto di vista della gestione dei materiali, i presidi riutilizzabili generano 7 volte meno rifiuti solidi rispetto alle alternative usa e getta. Inoltre, autorevoli linee guida internazionali e dati dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) confermano che l'impiego di teleria riutilizzabile non comporta alcun aumento statisticamente significativo delle infezioni del sito chirurgico, garantendo un'assoluta sicurezza per il paziente, unitamente a un risparmio finanziario ospedaliero a lungo termine superiore al 50%. [12]

Tabella 2. Impatto emissivo ed economico delle vie di smaltimento dei rifiuti in ambiente ospedaliero.

Metodo di smaltimento	Impatto emissivo	Impatto economico
Incenerimento ad alta temperatura **(Rifiuti sanitari pericolosi - ROT)**	1.074 kg CO_2e per tonnellata	Costo da 10 a 20 volte superiore rispetto allo smaltimento dei rifiuti generici
Riciclaggio **(Rifiuti assimilabili agli urbani / plastica pulita)**	43 kg CO_2e per tonnellata	Costo base di riferimento

CAPITOLO 4: INQUINAMENTO DELLE ACQUE E GESTIONE DEI MEZZI DI CONTRASTO

4.1 L'impatto eco-tossicologico dei mezzi di contrasto

L'impiego di mezzi di contrasto (MDC) iodati e paramagnetici è imprescindibile per gran parte dell'imaging diagnostico e per la totalità delle procedure endovascolari. Si stima che a livello mondiale vengano somministrati circa 10 milioni di litri di mezzo di contrasto ogni anno. Il problema ecologico primario legato a queste molecole deriva dalle loro caratteristiche farmacocinetiche e chimiche: esse possiedono un'elevata idrosolubilità e una forte stabilità metabolica.

I MDC vengono escreti immodificati dai pazienti attraverso le urine nelle ore successive all'esame, immettendosi direttamente nei sistemi fognari civili. I tradizionali impianti di depurazione delle acque reflue non sono progettati per filtrare molecole di questa complessità, determinando un'estesa contaminazione dei fiumi, dei laghi e, progressivamente, delle falde acquifere destinate al rifornimento di acqua potabile. Nell'ambiente acquatico, questi composti generano prodotti di degradazione tossici che alterano profondamente i delicati equilibri dell'ecosistema. **[5] [8]**

4.2 Strategie di riduzione: ottimizzazione tecnologica e "Source Control"

L'abbattimento del carico di MDC nell'ambiente si basa su due pilastri fondamentali: la riduzione della quantità somministrata e il controllo alla fonte della dispersione. Sul fronte tecnologico, l'impiego della Tomografia Computerizzata a Doppia Energia (DECT) ha dimostrato di poter mantenere inalterata l'accuratezza diagnostica pur consentendo una riduzione del volume di contrasto iniettato compresa tra il 30% e il 50%, grazie all'ottimizzazione dell'energia del fascio radiogeno.

Sul piano della gestione logistica, la sostituzione dei piccoli flaconi monouso con grandi formati (flaconi *bulk* da 200 o 500 ml) abbinati a iniettori automatici multi-paziente e tecnologie *"syringeless"*, minimizza la quantità di contrasto residuo non utilizzato e abbatte drammaticamente il consumo di plastica derivante dalle siringhe usa e getta. L'adozione del lavaggio con soluzione salina (*saline flush*) assicura inoltre che l'intero volume di MDC presente nei raccordi venga spinto nel circolo del paziente, evitando di disperdere sostanza attiva nei rifiuti solidi.

L'iniziativa più innovativa per la tutela delle acque è rappresentata dal controllo alla fonte delle escrezioni. Lo studio *GREENWATER*, condotto in Olanda, ha sperimentato la fornitura ai pazienti di speciali sacche per la raccolta delle urine ("first-void urine bags") dotate di polimeri gelificanti. I pazienti sono stati istruiti a urinare nella sacca per le prime minzioni successive all'esame, fase in cui viene escreta la quasi totalità del mezzo di contrasto. Le sacche, una volta solidificate, vengono poi smaltite nei rifiuti domestici solidi destinate all'incenerimento, impedendo al liquido di raggiungere le fognature. L'applicazione di questo protocollo ha registrato tassi altissimi di adesione da parte dei pazienti e ha dimostrato una riduzione fino al 45% dell'immissione di iodio nelle acque pubbliche. **[5] [8] [12]**

CAPITOLO 5: "DIGITAL TEMPERANCE", INTELLIGENZA ARTIFICIALE E IL CARICO DEI DATI

5.1 La "CO2 invisibile" dei Data Center

La dematerializzazione delle pellicole radiografiche e l'avvento dei sistemi PACS (Picture Archiving and Communication System) hanno innegabilmente migliorato l'efficienza clinica, ma hanno generato una nuova forma di inquinamento, spesso ignorata dai clinici: la "CO2 invisibile" prodotta dall'archiviazione dei dati.

Negli ultimi undici anni, la dimensione media di uno studio TC è aumentata vertiginosamente, passando da 66 MB a 160 MB. L'archiviazione di enormi dataset, spesso comprensivi di ricostruzioni multiple, fasi non strettamente necessarie e dati grezzi duplicati, richiede server di grande potenza. Le emissioni di carbonio derivanti dal consumo elettrico dei data center globali e dai loro intensivi sistemi di raffreddamento ad acqua sono attualmente equiparabili a quelle prodotte dall'intera industria mondiale dell'aviazione civile. **[5]**

5.2 Soluzioni pratiche: "Digital Temperance" e Storage a Livelli

Il concetto di *"Digital temperance"* invita a un approccio sobrio ed essenziale, alla conservazione dei dati digitali. In ambito interventistico, ad esempio, non è necessario inviare al PACS l'intera serie di acquisizioni effettuate durante la centratura di un ago per biopsia; l'invio delle sole immagini chiave (*key images*) e dei volumi di controllo finale è sufficiente per garantire la validità medico-legale dell'atto, alleggerendo drasticamente il carico sui server.

A livello sistemico, i dipartimenti IT ospedalieri dovrebbero implementare logiche di *tiered storage* (archiviazione a livelli: hot, warm, cold). Questa

architettura organizza i dati in base alla frequenza di utilizzo: gli esami recenti rimangono su dischi rapidi e ad alto consumo (*hot*), mentre le immagini storiche vengono migrate automaticamente su server a lungo termine (*cold storage*), progettati per massimizzare il risparmio energetico. **[5]**

5.3 L'Intelligenza Artificiale in Radiologia: Un'arma a doppio taglio

L'integrazione dell'Intelligenza Artificiale (AI) nei processi radiologici è al centro di un intenso dibattito ecologico. Da un lato, i processi di addestramento (*training*) delle reti neurali e le immense capacità di calcolo necessarie per far girare gli algoritmi rappresentano un costo energetico formidabile.

Dall'altro lato, se opportunamente finalizzata, l'AI è il più potente alleato per la decarbonizzazione del reparto. I software predittivi possono azzerare i tempi morti ottimizzando le agende e prevedendo le disdette (*no-shows*). Dal punto di vista clinico, l'AI permette di abbattere i tempi di acquisizione delle Risonanze Magnetiche, di personalizzare in tempo reale i protocolli di iniezione di MDC in base alla fisiologia del paziente (eliminando gli sprechi) e di ricostruire immagini di altissima qualità partendo da scansioni TC a bassissima dose radiogena. In Radiologia Interventistica, la pianificazione automatizzata dei tragitti bioptici o ablativi e il miglioramento delle immagini ecografiche ed angiografiche si traducono in una marcata riduzione dei tempi di fluoroscopia, del consumo energetico del tubo radiogeno e della durata complessiva dell'occupazione della sala. **[1]**

CAPITOLO 6: COSTI, BARRIERE E PROSPETTIVE FUTURE

6.1 Le barriere al cambiamento

L'implementazione delle strategie "green" precedentemente descritte si scontra quotidianamente con barriere di natura culturale, logistica ed economica. Tra le limitazioni principali riportate in letteratura emergono:

1. La mancanza di dati trasparenti e di metriche chiare sui reali consumi energetici a disposizione del personale di sala.
2. La diffusa carenza di consapevolezza e di interesse per le questioni ambientali, spesso sacrificate di fronte alla pressione dei turni clinici.
3. Il timore infondato che pratiche come la segregazione attenta dei rifiuti comportino un aumento del carico di lavoro e disagi logistici.
4. L'inerzia comportamentale e la naturale resistenza del personale ai cambiamenti delle routine consolidate.
5. Gli ostacoli posti dalle agenzie regolatorie e dai produttori di dispositivi, che difendono la redditività dei materiali monouso.
6. La marcata assenza di una leadership forte (es. un *Climate Manager*) deputata a guidare la transizione ecologica all'interno delle Direzioni Sanitarie. **[1]**

6.2 Sostenibilità economica e accettazione da parte del paziente

Contrariamente alla percezione comune, la sostenibilità ambientale in sanità si sposa perfettamente con la sostenibilità finanziaria. Sebbene l'introduzione di tecnologie energeticamente efficienti possa richiedere un investimento iniziale, i risparmi a lungo termine generati dal taglio dei costi per lo smaltimento dei rifiuti, dalla riduzione delle bollette elettriche per i macchinari e i sistemi HVAC, e dall'eliminazione degli sprechi di materiale sterile sono immensi.

Oltre al risparmio diretto, i presidi sanitari eco-sostenibili godono di un rilevante ritorno d'immagine. L'opinione pubblica è oggi estremamente sensibile alle tematiche ambientali. Un'indagine di *Scholz et al.* **[20]** ha evidenziato che il 66.2% dei pazienti si dichiara favorevolmente disposto ad accettare e adottare attivamente percorsi di cura concepiti per il risparmio di risorse, dimostrando che la responsabilità ecologica aumenta la fiducia nell'istituzione sanitaria. Promuovere modelli di cura come le *Radiology Day Case Units* (RDCU), che garantiscono la dimissione in giornata per le procedure interventistiche minori, abbatte i giorni di degenza inutili, generando un risparmio misurato in 37.9 kg di CO2e giornalieri per ogni posto letto liberato. **[12]**

STUDIO SPERIMENTALE

7. OBIETTIVO

L'obiettivo principale del presente studio sperimentale è valutare la fattibilità clinica e l'impatto ecologico di un protocollo pilota "green" applicato alle procedure di biopsia polmonare in Radiologia Interventistica. Il progetto intende dimostrare come l'implementazione di accorgimenti tecnici mirati e una riorganizzazione sinergica del lavoro d'équipe possano ridurre significativamente l'impronta ambientale del reparto, garantendo al contempo la massima sicurezza per il paziente e l'assoluta accuratezza diagnostica dell'esame. Nello specifico, lo studio mira a quantificare il risparmio tangibile ottenuto su tre fronti operativi: il consumo di materiali plastici e presidi sterili, il fabbisogno energetico e radiogeno, e l'occupazione di spazio di archiviazione digitale sui server ospedalieri.

Il fondamento di questo modello organizzativo risiede nella centralità del Tecnico Sanitario di Radiologia Medica (TSRM), che assume il ruolo di coordinatore dell'ottimizzazione sostenibile. L'intervento del TSRM, dalla fase di posizionamento del paziente fino alla gestione avanzata dei software di navigazione angiografica direttamente dalla sala comandi, si pone l'obiettivo di ottimizzare la fluidità della procedura. Lo studio intende misurare come questa specifica ridistribuzione dei compiti consenta al medico interventista di mantenere inalterata la sterilità del campo operatorio con maggiore efficienza, abbattendo il consumo di dispositivi di protezione (guanti sterili) e coperture plastiche monouso.

Dal punto di vista dell'efficientamento energetico e dosimetrico, lo studio si prefigge di validare una razionalizzazione del flusso di acquisizione delle

immagini. La nostra analisi valuta l'impatto derivante dall'eliminazione di step di scansione non strettamente necessari, compensata dalla padronanza dei sistemi di *guidance* intraoperatoria, con lo scopo di quantificare la conseguente riduzione della dose radiante erogata e del consumo di energia elettrica associato all'attivazione del macchinario.

Infine, il progetto ha l'obiettivo di applicare i principi della *Digital Temperance* alla gestione dei dati radiologici, al fine di dimostrare come l'intervento del TSRM come "filtro" nell'archiviazione — limitando l'invio al sistema PACS istituzionale alle sole *key images* ad alto significato clinico, in sostituzione delle intere serie volumetriche generate — possa generare una contrazione massiva dello spazio di memoria occupato sui server, riducendo di riflesso l'energia necessaria al mantenimento e al raffreddamento delle infrastrutture informatiche.

In conclusione, il presente studio intende dimostrare che un miglioramento tecnico-organizzativo in radiologia interventistica può convergere pienamente coi principi della sostenibilità, mediante la validazione di un protocollo procedurale riproducibile in cui la competenza e il ruolo attivo del TSRM generano benefici ecologici misurabili nella pratica quotidiana.

8. MATERIALI E METODI

Studio pilota monocentrico prospettico.
I dati sono riferiti a pazienti afferenti alla SOD di Radiologia Interventistica dell'Azienda Ospedaliero-Universitaria delle Marche.
Il protocollo dello studio ha ottenuto l'approvazione di un board interno.

8.1 POPOLAZIONE

Sono arruolati tutti i pazienti consecutivamente sottoposti a biopsia polmonare CBCT guidata eseguita con il protocollo oggetto di analisi dal 1 Luglio al 15 Settembre 2026.

Sono stati inclusi:

- Pazienti maggiorenni;
- Pazienti con lesioni approcciabili per via percutanea polmonare;
- Pazienti privi di controindicazioni alle biopsie percutanee;
- Pazienti collaboranti in grado di mantenere il tempo necessario di apnea respiratoria e con decubito indifferente.

Inoltre sono stati selezionati un medesimo numero di pazienti sottoposti a biopsia polmonare percutanea da Febbraio 2026 a Maggio 2026 mediante protocollo standard con analoghe caratteristiche demografiche e cliniche (sesso, età, dimensioni lesioni e localizzazione lesione) al fine di effettuare un confronto dei parametri tecnici e degli outcome clinici del nuovo protocollo e del protocollo standard.

8.2 Protocollo **G**reen **L**ung **O**ptimization in **B**iopsy **E**xecution (GLOBE)

Il protocollo **G**reen **L**ung **O**ptimization in **B**iopsy **E**xecution **("G.L.O.B.E.")** è stato strutturato attraverso una revisione delle competenze e mansioni TSRM prima, durante e dopo la procedura, atta a ridurre l'impatto energetico e ambientale della procedura stessa. Tutte le procedure sono state seguite nella stessa sala angiografica dotata di sistema angiografico Azurion Philips (DATI PHILIPS).
Di seguito sono riportate tutte le fasi del protocollo:

1) Fase pre-procedurale:

a) Colloquio, training respiratorio e posizionamento

Dopo colloquio con il paziente il medico radiologo interventista acquisisce il consenso informato e successivamente procede ad un corretto *training* del paziente per la corretta esecuzione della dinamica respiratoria durante la procedura stessa. Questa fase di *training* è cruciale: l'eliminazione dell'escursione diaframmatica e del movimento della gabbia toracica garantisce la perfetta riproducibilità spaziale del bersaglio polmonare, evitando artefatti da movimento che costringerebbero alla ripetizione di scansioni, con conseguente spreco di dose radiante e di energia. Successivamente, in base allo studio pre-operatorio delle immagini TC recenti, il medico definisce il decubito ottimale (prono, supino o con braccia elevate oltre il capo). Il posizionamento sul lettino angiografico avviene in sinergia con il personale infermieristico, che provvede al contestuale allestimento del monitoraggio emodinamico continuo (elettrocardiogramma, pressione arteriosa e saturazione ossimetrica).

b) ***Centratura, planning della traiettoria e risparmio di materiali***

In questa fase si inserisce il primo intervento attivo di mitigazione ambientale a cura del TSRM. Il Tecnico posiziona la paratia piombata anti-X, calcolando preventivamente le angolazioni di lavoro affinché il medico non debba più spostarla durante l'esame. Questo accorgimento logistico elimina la necessità di rivestire la paratia con la consueta busta di plastica sterile, garantendo il primo risparmio netto di materiale di consumo rispetto al protocollo standard. Parallelamente, il TSRM posiziona l'arco angiografico in assetto PROP (arco in testa), preparandolo per la scansione.

c) Prima scansione Cone-Beam CT (CBCT) e planning della procedura.

Le immagini ottenute vengono elaborate tramite il software di navigazione *XperGuide* (Philips). Questa prima valutazione, che include la scelta del *target*, lo studio dell'anatomia e la definizione della traiettoria dell'ago (calcolata per evitare l'intersezione con strutture costali, pleuriche e vasi arteriosi), viene eseguita dal medico prima della vestizione sterile.

2) Fase intra-procedurale:

a) Valutazione e marcatura entry point.

Completato il *planning*, il medico procede con la vestizione sterile e prepara il campo operatorio. In base al protocollo GLOBE, il kit bioptico viene razionalizzato: non viene utilizzata la busta sterile per la paratia piombata, mentre si posiziona unicamente la cuffia sterile sui comandi essenziali dell'arco angiografico. Sfruttando la "vista di ingresso" (*Entry Point View*) fornita dal software, viene apposto il repere cutaneo, a cui fa seguito l'anestesia locale e l'inserzione dell'ago da biopsia in guida fluoroscopica.

b) Progressione dell'ago.

Durante la progressione dell'ago verso il *target*, il ruolo del TSRM dalla sala comandi diviene l'elemento cardine della sostenibilità del protocollo: prende in gestione il software *XperGuide*: modifica le finestre di visualizzazione e reimposta le traiettorie di navigazione in tempo reale sulla base dei comandi vocali del medico. Questo passaggio rappresenta il *core* del risparmio sui consumabili: non dovendo interagire direttamente con la console non sterile, il medico mantiene intatta la propria asepsi per tutta la durata dell'esame. Nel protocollo tradizionale, ogni interazione con i software richiedeva al medico la rimozione e la sostituzione di un nuovo paio di guanti sterili, generando una quantità massiccia di rifiuti plastici che il nuovo protocollo azzera completamente.

c) Conferma posizione dell'ago e esecuzione biopsia

Centrata la lesione e confermato il posizionamento con un'ulteriore CBCT mirata, si procede al prelievo del frustolo tissutale. Dopo la valutazione dell'idoneità del campione da parte del medico, l'ago viene rimosso, iniettando contestualmente acido tranexamico (Ugurol) lungo la traccia bioptica al fine di minimizzare il rischio di complicanze emorragiche o pneumotorace (PNX). Si esegue infine una CBCT conclusiva a *Full-FOV* (non collimata) per escludere eventuali spandimenti alveolari o PNX, seguita dal trasferimento e dal monitoraggio del paziente a letto.

3) Fase post – procedurale:

L'ultima fase del protocollo GLOBE, interamente affidata al TSRM, riguarda la fase di post processing. Il Tecnico disattiva l'invio automatico dei dati grezzi e delle ricostruzioni tridimensionali non diagnostiche ai server aziendali. Al sistema PACS vengono inviate nella loro interezza volumetrica unicamente la CBCT iniziale, la CBCT di prelievo e la CBCT

finale di controllo. Per tutte le altre scansioni intermedie di posizionamento dell'ago, il TSRM seleziona e trasferisce manualmente solo singole immagini significative (*key images*, tipicamente nei piani assiale e sagittale) che documentano la progressione della strumentazione.

8.3 Parametri tecnici

Al fine di quantificare in modo oggettivo l'impatto del nuovo modello organizzativo e confrontarne l'efficacia rispetto alla pratica clinica tradizionale, sono stati individuati e monitorati specifici indicatori di *performance* ecologica, dosimetrica e logistica. I parametri oggetto di indagine per ciascuna procedura bioptica sono stati suddivisi in tre macro-aree di valutazione:

- ***Consumo energetico e ottimizzazione dosimetrica****:* È stato registrato il numero totale di acquisizioni Cone-Beam CT (CBCT) eseguite per singola procedura e il grado di collimazione applicato in ciascuna scansione. Tali variabili sono state analizzate in funzione dell'assorbimento elettrico dell'apparecchiatura angiografica.
- ***Archiviazione digitale e Digital Temperance****:* È stato valutato l'impatto informatico dell'esame quantificando il volume di dati trasferito ai server ospedalieri. I parametri misurati comprendono il numero di immagini inviate, il peso medio totale dell'esame completo mandato al PACS e il peso della singola scansione CBCT trasferita (espressi in Megabyte).
- ***Generazione di rifiuti solidi e consumabili plastici***: Nell'ambito dell'impiego dei materiali monouso, il monitoraggio si è focalizzato sul conteggio di due specifiche tipologie di consumabili: le buste sterili di copertura (impiegate tipicamente per rivestire le paratie piombate) e le paia di guanti sterili utilizzate dal medico interventista.

I suddetti parametri, misurati sistematicamente nella coorte di pazienti a cui è stato applicato il protocollo prospettico *GLOBE*, sono stati successivamente confrontati con gli analoghi indici ricavati dalla coorte storica, trattata secondo il protocollo standard. Tale confronto è finalizzato a determinare l'effettivo risparmio ambientale e logistico raggiunto grazie al nuovo protocollo *GLOBE*.

8.4 Outcome clinici

Per ciascuna procedura oltre ai parametri relativi alla sostenibilità sono stati considerati dei parametri clinici per validare in protocollo *GLOBE* anche da un punto di vista clinico. Per questo sono stati considerati:

- **Successo Tecnico:** Considerato come la capacità dell'équipe di portare a termine l'intera procedura bioptica fino alla rimozione dell'ago, senza che si verifichino interruzioni, limitazioni o fallimenti. Si intende dimostrare che il nuovo assetto organizzativo, comprendente la gestione remota del software di navigazione direttamente dalla sala comandi, garantisce la medesima (se non superiore) fluidità operativa rispetto alla tradizionale gestione diretta al tavolo operatorio. Tutto ciò definisce ***la fattibilità*** della procedura.
- **Tasso di complicanze**: Viene valutato attraverso il monitoraggio dell'incidenza di complicanze peri e post-procedurali (come, ad esempio, pneumotorace, emorragia alveolare o emottisi) che definisce ***la sicurezza*** della procedura stessa.
- **Successo Clinico :** È misurata attraverso il tasso di successo e adeguatezza del prelievo tissutale. L'outcome è considerato positivo se il campione bioptico ottenuto (frustolo) risulta quantitativamente e qualitativamente idoneo per l'analisi anatomo-patologica, la tipizzazione istologica e l'eventuale profilazione genetica. Questo determina ***l'efficacia*** della procedura.

Questi outcome sono stati ***successivamente confrontati*** con i medesimi outcome ottenuti dalla coorte storica effettuata con ***protocollo standard*** per verificare la fattibilità, la sicurezza e l'efficacia del protocollo ***GLOBE***.

CAPITOLO 9: RISULTATI

Sono inclusi un totale di 11 pazienti eseguiti mediante protocollo *GLOBE*, le cui caratteristiche demografiche e radiologiche sono riassunte in **Tabella 3**.

Il gruppo di confronto sottoposto a biopsia percutanea CBCT guidata con protocollo standard presentava caratteristiche demografiche e radiologiche simili riassunte in **Tabella 4.**

Parametro valutato		**Valore medio [range]**
• Numero pazienti		11
• Età media (anni)		67.1 [53 – 80]
• Sesso (Maschi/Femmine)		5 M/6 F
• Dimensione media lesione (cm)		1.35 [0.4 – 4.3]
• Lobo polmonare	- Superiore destro	2
	- Medio	0
	- Inferiore destro	4
	- Superiore sinistro	4
	- Inferiore sinistro	1
• Distanza media dalla pleura (cm)		1.9 [0 – 4.5]
• Numero medio CBCT		5.9 [4 – 9]
• Numero medio immagini inviate al PACS		1296 [612 – 2354]
• Numero medio guanti utilizzati		1.0 [1 – 1]

Tabella 3: Caratteristiche popolazione gruppo 2 –protocollo *GLOBE*

Parametro valutato		**Valore medio [range]**
• Numero pazienti		11
• Età media (anni)		67.1 [52 – 81]
• Sesso (Maschi/Femmine)		6 M/5 F
• Dimensione media lesione (cm)		1.52 [0.7 – 4.2]
• Lobo polmonare	- Superiore destro	3
	- Medio	1
	- Inferiore destro	0
	- Superiore sinistro	3
	- Inferiore sinistro	4
• Distanza media dalla pleura (cm)		1.3 [0 – 2.5]
• Numero medio CBCT		7.3 [4 – 9]
• Numero medio immagini inviate al PACS		4035 [3242 – 5861]
• Numero medio guanti utilizzati		3.4 [3 – 4]

Tabella 4. Caratteristiche popolazione gruppo 1 – protocollo Standard

Parametro valutato		Valore medio [range]
• Numero pazienti		22
• Età media (anni)		67.1 [52 – 81]
• Sesso (Maschi/Femmine)		9 M/13 F
• Dimensione media lesione (cm)		1.44 [0.4 – 4.3]
• Lobo polmonare	- Superiore destro	5
	- Medio	1
	- Inferiore destro	4
	- Superiore sinistro	7
	- Inferiore sinistro	5
• Distanza media dalla pleura (cm)		1.6 [0 – 4.5]
• Numero medio CBCT		6.9 [6 – 9]
• Numero medio immagini inviate al PACS		3206 [612 – 5861]
• Numero medio guanti utilizzati		2.2 [1 – 4]

Tabella 5. Caratteristiche popolazione oggetto dello studio (Gruppo 1 + Gruppo 2)

9.1 Consumo Energetico e Archiviazione Dati

a) Gruppo prospettico *GLOBE*

Nel gruppo di studio in cui è stato applicato il protocollo *GLOBE*, il numero di acquisizioni Cone-Beam CT (CBCT) si è attestato su un valore medio di **5,9 scansioni per esame** (range: 4 - 9). In applicazione rigorosa dei principi di Digital Temperance, il volume di dati trasferito e archiviato nei server PACS è risultato pari a una media di **soli 96,8 Megabyte (MB)** per singola procedura.

b) Confronto con il gruppo standard

L'analisi comparativa con la coorte sottoposta alla pratica clinica standard ha rivelato riduzioni altamente significative per tutti i parametri energetici e informatici analizzati:

- **Riduzione delle CBCT:** Si è registrata una contrazione del 19,2% nel numero medio di scansioni, che sono passate dalle 7,3 del gruppo standard (range: 6 - 9) alle 5,9 del protocollo GLOBE, annullando di fatto le acquisizioni superflue per il posizionamento iniziale.

- **Riduzione dell'archiviazione PACS:** L'intervento selettivo del TSRM ha determinato una riduzione massiva del 93,4% del peso informatico. Il volume dei dati è precipitato dai 1460 MB medi generati da un singolo protocollo standard ai 96,8 MB medi del protocollo *GLOBE*.

	Peso medio totale (MB) esame completo mandato al PACS	*Peso singola CBCT (MB)*
Protocollo standard	1460	16,6
Protocollo green	96,8	3,88

Tabella 6. Confronto dei pesi (MB) tra protocollo standard e *GLOBE*.

- **Riduzione della Dose:** Conseguentemente all'ottimizzazione delle rotazioni e alla severa collimazione dei campi, si è osservata una riduzione dell'esposizione radiogena nel gruppo sottoposto al protocollo *GLOBE*. Tuttavia, la variabilità intrinseca delle singole procedure e la ridotta dimensione del campione attualmente in esame non consentono, al momento, di definire tale riduzione come statisticamente significativa, rendendo necessari futuri studi su coorti più ampie per validare questo trend positivo.

c) Traduzione in termini di Carbon Footprint

La contrazione del 93,4% dello spazio di memoria occupato si traduce in un imponente abbattimento della "CO2 invisibile" generata dall'infrastruttura IT. Secondo le stime di Life Cycle Assessment (LCA) applicate al data storage (i moderni calcolatori di decarbonizzazione digitale indicano che 1 GB di archiviazione produce circa 0,025 - 0,04 kg di CO2e/anno), l'invio mirato di sole *key images* fa risparmiare 1,36 GB per ogni paziente.
Per comprendere la portata tangibile della Digital Temperance, basti pensare che **il risparmio di archiviazione generato sul singolo paziente**

compensa le **emissioni** prodotte da un'autovettura che percorre circa **4 chilometri nel traffico urbano**, o **all'energia necessaria** per mantenere **illuminata una stanza** con tecnologia LED **per oltre una settimana ininterrotta**.

9.2 Consumo di Materiali Consumabili

a) Consumo di guanti (Gruppo *GLOBE*)

L'adozione del protocollo *GLOBE*, ha abbattuto drasticamente lo spreco di dispositivi di protezione. Nel gruppo prospettico è stata impiegata unicamente 1,0 media di paia di guanti sterili per esame, con un range statistico inequivocabile (range: 1 – 1).

b) Consumo di buste sterili (Gruppo *GLOBE*)

La preventiva e strategica disposizione ergonomica delle paratie piombate in sala ha permesso di limitare il consumo a 1,0 sola busta di copertura plastica sterile per procedura (range: 1 - 1).

c) Percentuale di risparmio

Il protocollo *GLOBE* ha generato un risparmio netto del 70,6% sul consumo dei guanti sterili chirurgici e del 50,0% sull'utilizzo delle buste di plastica. In valore assoluto, il totale dei presidi monouso impiegati è crollato da una media di 5,4 oggetti a soli 2,0 per paziente, segnando una riduzione globale del carico plastico pari al 63%.

	Utilizzo medio per singola procedura biopsia polmonare standard	**Utilizzo medio per singola procedura biopsia polmonare protocollo *GLOBE***
Guanti sterili	8	1
Buste paratia	1	0

Tabella 7. Confronto dei consumabili tra protocollo standard e *GLOBE*

e) Traduzione in termini di Carbon Footprint

La quantificazione dell'impronta carbonica relativa ai consumabili plastici sanitari sconta due fasi emissive critiche: la produzione (con un LCA medio stimato in circa 0,055 kg CO2e per un singolo paio di guanti in nitrile/cloroprene di grado chirurgico) e la dismissione.

9.3 Outcome Clinici e Procedurali

La spiccata vocazione ecologica del protocollo *GLOBE* si è dimostrata perfettamente compatibile con la massima eccellenza terapeutica, non evidenziando alcun compromesso qualitativo a fronte dei risparmi energetici e materiali ottenuti. In fase di analisi degli outcome sono emersi i seguenti risultati:

- **Fattibilità (Successo Tecnico): 100%.** Nella totalità dei casi, l'équipe ha portato a termine la procedura bioptica senza l'insorgenza di anomalie tecniche, interruzioni o impedimenti operativi.
- **Efficacia (Successo Clinico): 90,9%.** Si è evidenziata una altissima capacità di centrare accuratamente il target polmonare e di estrarre un campione (frustolo) idoneo e sufficiente per la diagnosi istologica .
- **Sicurezza (Tasso di complicanze): 0%.** L'intera coorte GLOBE non ha registrato alcun evento avverso correlato alla manovra.

Tali eccellenti valori di fattibilità, efficacia e sicurezza risultano in linea e statisticamente sovrapponibili a quelli ottenuti nel gruppo di riferimento storico trattato con il protocollo standard. L'assenza di penalizzazioni cliniche convalida il protocollo *GLOBE* come un modello eccellente, in cui l'efficienza manageriale e ambientale coincide appieno con la tutela e la cura del paziente.

CAPITOLO 10: DISCUSSIONE

Il settore sanitario globale contribuisce per circa il 5% alle emissioni totali di gas serra. In questo contesto, l'imaging medico è responsabile da solo del 10% di tali emissioni, con la Radiologia Interventistica (IR) che si attesta tra le aree ospedaliere a maggiore impatto: si stima, infatti, che una singola procedura generi tra i 77 e i 243 kg di CO2 equivalente (CO2e). Questa criticità deriva da due fattori principali. Il primo è l'elevato consumo di energia elettrica: un singolo tomografo TC assorbe tra i 20.000 e i 35.000 kWh annui, dissipando in media dal 66% al 91% di tale energia nei tempi morti di inattività (*idle state*). A questo carico si sommano i sistemi di climatizzazione (HVAC) necessari per mantenere i parametri microclimatici e di sterilità delle sale, che da soli incidono per circa il 45% sui consumi elettrici totali. Il secondo fattore è l'abbondante produzione di rifiuti solidi. Per garantire la rigorosa asepsi, le procedure interventistiche impongono un uso massiccio di presidi monouso e imballaggi in plastica, i quali arrivano a costituire ben il 54,8% del peso totale dei prodotti utilizzati. Lo smaltimento di questi materiali avviene tramite processi di incenerimento che rilasciano in atmosfera 1074 kg di CO2e per ogni tonnellata bruciata. Alla luce di questi dati oggettivi, l'applicazione di strategie di sostenibilità e di ottimizzazione delle risorse in reparto è diventata a tutti gli effetti una stringente necessità clinica e gestionale.

I principali obiettivi di una radiologia interventistica sostenibile possono essere riassunti nella massima riduzione di tutti gli sprechi alla fonte. Per diminuire il consumo energetico, è necessario razionalizzare l'uso delle apparecchiature: collimare i campi radiogeni e applicare la *Digital Temperance*. Questo concetto prevede l'archiviazione esclusiva delle sole immagini clinicamente utili, evitando il salvataggio di pesanti dati grezzi, per ridurre così il consumo elettrico dei server ospedalieri. Riguardo alla generazione dei rifiuti, il miglioramento si ottiene rivedendo

l'organizzazione del flusso di lavoro. Inoltre, una corretta pianificazione della quantità di materiali monouso da utilizzare prima dell'esame, unita alla limitazione dell'uso superfluo di Dispositivi di Protezione Individuale (DPI), come coperture e guanti sterili, riduce significativamente la quantità di plastica destinata allo smaltimento speciale.

L'obiettivo del nostro studio pilota è stato quello di testare un protocollo green per ridurre il consumo energetico e la produzione dei rifiuti durante una procedura ad elevati volumi, come la biopsia polmonare CBCT guidata, in particolare incentivando la collaborazione tra radiologo interventista e TSRM.
Nella nostra esperienza abbiamo ottenuto:

- Riduzione del consumo energetico e dosimetrico: Abbiamo registrato una riduzione del 19,2% nel numero medio di acquisizioni CBCT (da 7,3 a 5,9). Eliminare le scansioni non necessarie ha portato, inoltre, a una riduzione diretta della dose radiante erogata.
- Riduzione dell'archiviazione dati: Il trasferimento selettivo delle immagini ha ridotto il peso informatico del 93,4% (da 1460 MB a 96,8 MB). Questo minor carico sui server aziendali evita l'emissione a lungo termine di circa 0,4 - 0,5 kg di CO_2 equivalente per ogni paziente trattato.
- Riduzione della produzione di rifiuti: Il nuovo protocollo ha ridotto del 70,6% l'uso di guanti sterili e del 50,0% l'uso di buste piombate. Evitare l'utilizzo e l'incenerimento di queste plastiche permette di risparmiare direttamente tra 0,6 e 0,8 kg di CO_2 equivalente a procedura.

I risultati ottenuti sono molto promettenti seppur ottenuti in uno studio pilota su un campione ristretto di procedure. Le differenze più significative

rispetto al protocollo standard includono un netto risparmio di materiali (grazie all'eliminazione delle coperture sterili e alla drastica riduzione dei guanti monouso, ottenuta delegando la gestione software al TSRM in remoto), un risparmio dosimetrico ed energetico (grazie alla precisione di centratura e all'eliminazione delle CBCT superflue) e un evidente alleggerimento dei sistemi di raffreddamento dei server PACS.

Inoltre, va sottolineato che a fronte di un netto miglioramento della *sustainable green* delle procedure appare immodificato il profilo di fattibilità, sicurezza ed efficacia della procedura stessa. Tali risultati appaiono, tuttavia, ottenibili solo grazie al maggiore coinvolgimento e incremento della responsabilizzazione del TSRM durante le procedure. Infatti tutti gli step inclusi nel protocollo *GLOBE* appaiono nettamente dipendenti dalla maggiore collaborazione tra radiologo interventista e TSRM**.** Nello specifico, per il corretto funzionamento del protocollo, il TSRM esegue le seguenti attività:

- Posizionamento pre-procedurale della paratia piombata e dell'arco angiografico, eliminando il bisogno di coperture in plastica.
- Acquisizione mirata della CBCT iniziale e utilizzo costante della collimazione per risparmiare radiazioni.
- Gestione da remoto del software *XperGuide* dalla sala comandi, modificando finestre di visualizzazione e traiettorie su indicazione del medico. Questo passaggio è la chiave per evitare al radiologo di perdere la sterilità e cambiare i guanti.
- Selezione post-procedurale delle sole immagini significative (assiali e sagittali) per l'invio al PACS, annullando il trasferimento automatico dei dati grezzi.

Il nostro studio presenta comunque dei limiti come:

- *Campione esiguo:* Abbiamo analizzato un numero ridotto di procedure (11 pazienti per gruppo). Pur avendo ottenuto un netto divario ecologico ed economico, un campione più ampio sarà necessario in futuro per dare maggiore potenza statistica ai risultati.
- *Singola tipologia di procedura:* Abbiamo valutato esclusivamente la biopsia polmonare percutanea. Sebbene sia un esame frequente e molto richiesto, sarà fondamentale verificare l'applicazione di questo protocollo organizzativo anche su interventi più complessi e duraturi, come le termoablazioni.

CAPITOLO 11: CONCLUSIONE

Il nostro studio pilota ha evidenziato che l'implementazione del protocollo ecosostenibile *GLOBE* nelle biopsie polmonari TC-guidate rappresenta un approccio tecnicamente e clinicamente valido. L'adozione di mirate strategie organizzative ha permesso di abbattere significativamente l'impronta carbonica della procedura, intervenendo con successo sulle tre principali criticità ecologiche della Radiologia Interventistica: lo spreco di consumabili monouso, l'inefficienza energetica e il sovraccarico dei dati informatici.

È stato comprovato come l'eliminazione di acquisizioni radiogene superflue, la rigorosa collimazione dei campi e la sistematica applicazione della *Digital Temperance* generino un drastico risparmio di risorse dosimetriche e di spazio sui server ospedalieri. L'ottimizzazione del setup di sala ha abbattuto il carico di rifiuti plastici destinati ai processi inquinanti di incenerimento. Risulta di fondamentale importanza sottolineare che tali benefici ecologici sono stati ottenuti garantendo tassi di successo tecnico e clinico eccellenti, a fronte di una totale assenza di complicanze. Questo dato certifica che la sostenibilità ambientale in sala angiografica non richiede alcun compromesso in termini di sicurezza o qualità delle cure offerte al paziente.

Il vero fattore abilitante di questo modello risiede nella riorganizzazione del lavoro d'équipe e nella valorizzazione del Tecnico Sanitario di Radiologia Medica. Il protocollo *GLOBE* sposta il baricentro dell'efficienza sull'attività del TSRM: assumendo la gestione remota del software di navigazione dalla sala comandi, il Tecnico solleva il medico dalle interazioni non sterili — azzerando lo spreco di guanti — e funge da filtro per i dati in fase di post-elaborazione. Questo studio conferma, pertanto, che la reale transizione ecologica nei dipartimenti radiologici non dipende esclusivamente

dall'innovazione tecnologica, ma è strettamente subordinata all'evoluzione delle competenze tecniche e alla massima sinergia interprofessionale.

Pur necessitando di future validazioni su campioni numericamente superiori e su interventi endovascolari o ablativi di maggiore complessità, il protocollo *GLOBE* traccia una rotta chiara e riproducibile. Integrare la tutela dell'ambiente all'interno dei percorsi diagnostico-terapeutici non costituisce più un'opzione secondaria, ma rappresenta il nuovo standard di qualità dell'assistenza sanitaria, concretizzando definitivamente il principio clinico ed etico *"Healing the patient, preserving the planet"*.

12. BIBLIOGRAFIA

[1] Floridi C (2025) Healing the Patient, preserving the planet: Green Strategies in IO. Italian Conference on Interventional Oncology (ICIO 2025). Milano, 15-16 December 2025.

[2] Bonaldi A, Barcella S, Santini G et al (2024) Manuale per ridurre l'impronta climatica dei servizi sanitari. ASST Papa Giovanni XXIII, Ordine dei Medici Chirurghi e degli Odontoiatri della Provincia di Bergamo, Edizione 1.0.

[3] Brassil MP, Torreggiani WC (2019) Recycling in IR, what IR specialists can do to help. Cardiovasc Intervent Radiol 42(6):789–790. https://doi.org/10.1007/s00270-019-02206-9

[4] Büttner L, Posch H, Auer T et al (2021) Switching off for future-Cost estimate and a simple approach to improving the ecological footprint of radiological departments. Eur J Radiol Open 8:100320. https://doi.org/10.1016/j.ejro.2021.100320

[5] Cacioppa LM (2026) Back to Basics - TC: Impatto ambientale. Webinar SIRM Giovani, Società Italiana di Radiologia Medica e Interventistica.

[6] Chua ALB, Amin R, Zhang J et al (2021) The Environmental Impact of Interventional Radiology: An Evaluation of Greenhouse Gas Emissions from an Academic Interventional Radiology Practice. J Vasc Interv Radiol 32(6):907–915.e3. https://doi.org/10.1016/j.jvir.2021.03.531

[7] Clements W, Chow J, Corish C et al (2020) Assessing the Burden of Packaging and Recyclability of Single-Use Products in Interventional Radiology. Cardiovasc Intervent Radiol 43(6):910–915. https://doi.org/10.1007/s00270-020-02427-3

[8] Dekker HM, Stroomberg GJ, Prokop M et al (2022) Tackling the increasing contamination of the water supply by iodinated contrast media. Insights Imaging 13:30. https://doi.org/10.1186/s13244-022-01175-x

[9] Hainc N, Brantner P, Zaehringer C et al (2020) "Green Fingerprint" Project: Evaluation of the Power Consumption of Reporting Stations in a Radiology Department. Acad Radiol 27(11):1594–1600. https://doi.org/10.1016/j.acra.2019.11.020

[10] Heye T, Knoerl R, Wehrle T et al (2020) The energy consumption of Radiology: Energy- and cost-saving opportunities for CT and MRI operation. Radiology 295(3):593–605. https://doi.org/10.1148/radiol.2020192084

[11] Kagoma Y, Stall N, Rubinstein E et al (2012) People, planet and profits: the case for greening operating rooms. CMAJ 184(17):1905–1911. https://doi.org/10.1503/cmaj.112139

[12] Lambracos S, Kurek N, Gray WK et al (2026) Call to Action: A Sustainable Interventional Radiology Service. Cardiovasc Intervent Radiol. https://doi.org/10.1007/s00270-026-04392-9

[13] McAlister S, McGain F, Petersen M et al (2022) The carbon footprint of hospital diagnostic imaging in Australia. Lancet Reg Health West Pac 24:100459. https://doi.org/10.1016/j.lanwpc.2022.100459

[14] Picano E, Mangia C, D'Andrea A (2023) Climate change, carbon dioxide emissions, and medical imaging contribution. J Clin Med 12(1):215. https://doi.org/10.3390/jcm12010215

[15] Roletto A, Savio A, Masperi A et al (2025) Energy Usage Assessment and Energy Savings Estimation in a Radiology Department in Italy. Energies 18(8):1936. https://doi.org/10.3390/en18081936

[16] Schoen JH, May G, Christensen J et al (2024) Savings in CT Net Scan Energy Consumption: Assessment Using Dose Report Metrics and Comparison With Savings in Idle State Energy Consumption. AJR Am J Roentgenol 222(3):e2330452. https://doi.org/10.2214/AJR.23.30452

[17] Thiel CL, Vigil-Garcia M, Nande S et al (2024) Environmental Life Cycle Assessment of a U.S. Hospital-based Radiology Practice. Radiology 313(2):e240398. https://doi.org/10.1148/radiol.240398

[18] Vosshenrich J, Weiger M, Erni D et al (2024) Interventional Imaging Systems in Radiology, Cardiology, and Urology: Energy Consumption, Carbon Emissions, and Electricity Costs. AJR Am J Roentgenol 222(6):e2430988. https://doi.org/10.2214/AJR.24.30988

[19] Walters H, Gichoya JW, Banerjee I et al (2024) Reducing the carbon footprint of radiology through automatic workstation shutdown protocols. Clin Radiol 79(5):401-407. https://doi.org/10.1016/j.crad.2024.01.015

[20] Scholz F, Börner N, Schust J et al (2024) Focus on patient perspectives in climate action policies for healthcare: a German survey analysis on what patients are willing to do. Front Public Health 12:1477313. https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1477313