

Qualità dell'Aria negli Edifici Scolastici

WP3. Indagine sullo stato dell'arte e del mercato

Task 3.1 - Indagine sullo stato dell'arte: criteri e parametri che influenzano la qualità dell'aria negli edifici scolastici



Data: 31.07.2019

Task Leader: Eurac Research – Istituto per le Energie Rinnovabili

Autore: Chiara Ugolini

Co-autori: Annamaria Belleri

© ALL RIGHTS RESERVED

Table of Contents

1	Introduzione.....	3
2	Qualità dell'aria interna nelle scuole	4
2.1	Qualità dell'aria indoor	4
2.2	L'ambiente scolastico e i parametri che influenzano la IAQ nelle scuole	4
2.3	Fonti di inquinanti negli ambienti scolastici (indoor, outdoor, ground)	6
3	Caratteristiche e concentrazione degli inquinanti indoor delle scuole	9
3.1	Composti inorganici	9
3.1.1	Ossidi di azoto (NOx)	10
3.1.2	Ozono (O3)	10
3.1.3	Monossido di carbonio (CO).....	10
3.2	Radon (Rn).....	11
3.3	Composti organici volatili (VOC)	11
3.3.1	BTEX.....	13
3.3.2	d-limonene	14
3.3.3	Tricloroetilene	15
3.3.4	Tetracloroetilene	15
3.3.5	Formaldeide	15
3.4	Idrocarburi aromatici policiclici (PAH).....	16
3.5	Particelle e fibre	20
3.5.1	PM (Particulate Matter)	20
3.6	Contaminanti biologici	23
3.7	Anidride carbonica (CO ₂).....	25
4	Progetti europei.....	27
4.1	Studio HESE (Health Effect of School Environment)	27
4.2	Progetti SEARCH I, II e III	28
4.3	Progetto SINPHONIE	29
4.4	Progetto EnVIE	30
5	Protocolli di monitoraggio della IAQ nelle scuole.....	36
5.1	Monitoraggio ambientale	37
6	Impatto della qualità dell'aria nelle scuole su performance/assenze di studenti e insegnanti.....	41
6.1	Influenza IAQ sulla salute	41
6.2	Influenza della IAQ sulla performance e sull'assenteismo degli studenti.....	42
7	Buone pratiche e soluzioni.....	46
7.1	Effetti dell'attuazione di piani per il ricambio dell'aria (progetto SIMARIA, Svizzera).....	47
7.2	Integrazione di unità di ventilazione meccanica decentralizzate nelle aule	48
7.3	Installazione di un sistema di ventilazione "Active Overflow" (Austria)	49

7.4	Piante “mangia-veleni” e pitture fotocatalitiche	50
8	Bibliography	52
	ANNEX A - Livelli di esposizione e valori limite	55

1 Introduzione

Il seguente report ha lo scopo di individuare, attraverso un'analisi di letteratura, quali sono i principali inquinanti dell'aria indoor negli edifici scolastici (a partire dagli asili nido fino alle scuole superiori) e quali sono le principali fonti di tali inquinanti, per definire i parametri che caratterizzano la qualità dell'aria negli ambienti scolastici.

Nel Capitolo 2 verrà fatta una panoramica su qualità dell'aria indoor e sugli ambienti scolastici, con focus su fonti di inquinanti e fattori che influenzano IAQ nelle scuole.

Nel Capitolo 3 sono stati analizzati nel dettaglio gli inquinanti misurati nelle scuole e ne sono state riportate caratteristiche, fonti e valori limite standard

Nel Capitolo 4 sono descritti i principali progetti europei sulla qualità dell'aria nelle scuole (obiettivi, metodi di lavoro e risultati) e nel Capitolo 5 sono riportati le metodologie di monitoraggio adottate.

Nel Capitolo 6 è stato analizzato l'impatto della qualità dell'aria nelle scuole su performance/assenze di studenti e insegnanti

Nel Capitolo 7 infine sono stati riportati alcuni riferimenti a linee guida e best practices per migliorare la qualità dell'aria all'interno degli ambienti scolastici.

2 Qualità dell'aria interna nelle scuole

2.1 Qualità dell'aria indoor

La qualità dell'aria interna (IAQ) si riferisce alla qualità dell'aria all'interno e intorno a edifici e strutture, in particolare per quanto riguarda la salute e il comfort degli occupanti dell'edificio. Comprendere e controllare gli inquinanti comuni al chiuso può aiutare a ridurre il rischio di problemi di salute in ambienti chiusi. L'Organizzazione mondiale della sanità (OMS) ha stimato che il 23% della mortalità globale totale e il 26% dei decessi nei bambini piccoli sono causati da ambienti malsani, cioè ambienti inquinati con fattori di rischio fisici, chimici e/ o biologici esterni a una persona che possono influire sulla salute delle persone (Landrigan et al., 2018). Gli effetti sulla salute degli inquinanti dell'aria indoor possono essere riscontrati subito dopo l'esposizione o, possibilmente, anni dopo. Per questo, per determinare gli effetti sulla salute dei bambini e degli insegnanti, oltre alla misura della concentrazione degli agenti inquinanti, è necessario definire anche la durata dell'esposizione: "short-term" ovvero inferiore alle 24h o "long-term" cioè della durata di più settimane (si veda ANNEX A).

L'aria è una miscela complessa composta tipicamente da più di 200-300 inquinanti (Marc O. Abadie, 2017). La European Respiratory Society ha individuato fra i principali agenti inquinanti presenti nell'aria interna monossido di carbonio (CO), anidride carbonica (CO₂), biossido o triossido di azoto (NO₂ – NO₃), idrocarburi policiclici aromatici (PHAs), particolato (PM_{2.5}, PM₁₀, ecc.), composti organici volatili (VOCs), allergeni (acari della polvere (HDM), muffe, pollini, allergeni da animali), formaldeide, radon, contaminanti biologici e ozono (O₃) (European Respiratory Society, n.d.). Gli inquinanti dell'aria interna possono essere suddivisi fra inquinanti gassosi, particelle (fibre, particelle organiche, ecc.) e biocontaminanti (come allergeni, batteri, muffe, ecc.), come mostrato in Figura 1 (Marc O. Abadie, 2018).

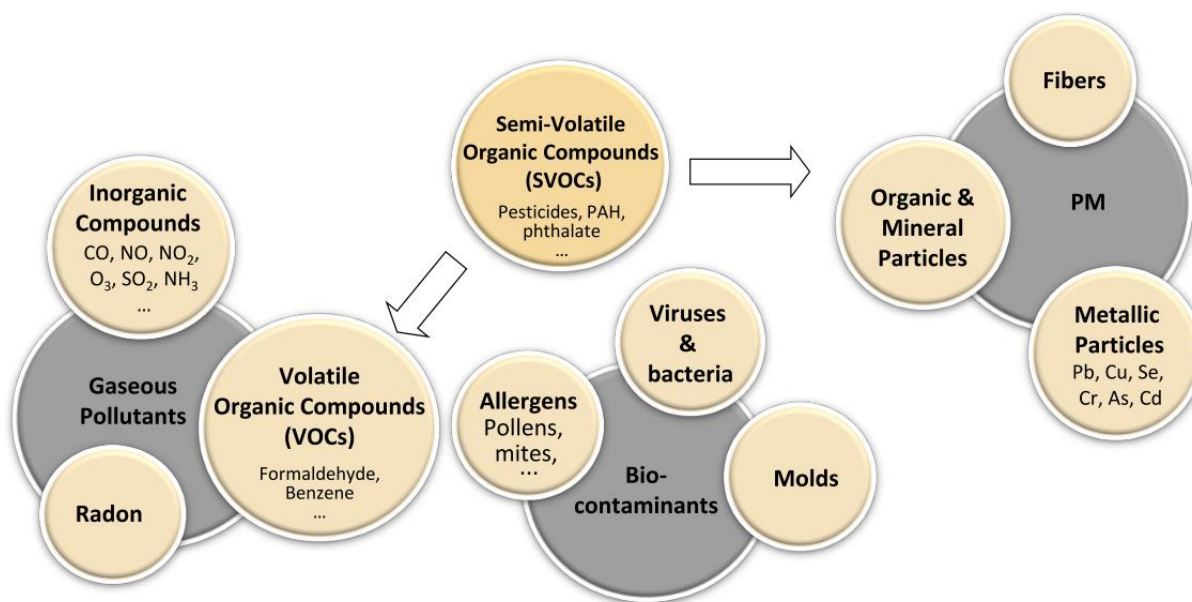


Figura 1 – Classificazione degli inquinanti indoor - Annex68 (Marc O. Abadie, 2017)

2.2 L'ambiente scolastico e i parametri che influenzano la IAQ nelle scuole

Gli edifici scolastici sono generalmente tutti caratterizzati da spazi chiusi (aule scolastiche e palestre) in cui i docenti e soprattutto i ragazzi, sin dall'infanzia, sono soliti spendere in media 6/8 ore al giorno in edifici destinati all'insegnamento e all'educazione.

La qualità dell'aria e la concentrazione di agenti inquinanti all'interno degli edifici scolastici è influenzata da una moltitudine di fattori complessi che interagiscono fra loro, quali interazione tra edificio e ambiente esterno (ad esempio la penetrazione dell'aria esterna), sorgenti interne specifiche di inquinanti, sistemi/tecniche costruttive, sistema di ventilazione, attività dei suoi occupanti, arredamento.

Secondo Cumo, Caruso, Ferroni, & Paladino (1994), i principali fattori che concorrono a determinare la concentrazione di un contaminante in ambienti chiusi sono:

- la relativa concentrazione nell'ambiente a causa di sorgenti indoor;
- la velocità di emissione delle sorgenti;
- la concentrazione presente nell'aria esterna;
- il numero di ricambi d'aria (sia attraverso sistemi di ventilazione artificiale che attraverso ventilazione naturale (manuale) che attraverso la normale tenuta degli infissi);
- la velocità vento, che può influire variando le quantità d'aria scambiata, per ventilazione naturale, tra interno ed esterno;
- i parametri termoigrometrici interni (temperatura, umidità);
- la densità degli occupanti dell'ambiente indoor.

Come riportato nel report di GARD-I (Baglioni et al., 2010), la qualità dell'aria all'interno delle scuole è determinata dai seguenti principali gruppi di fattori, il cui rapporto influenza qualitativamente e quantitativamente la IAQ:

- le **caratteristiche architettoniche, edilizie ed impiantistiche** della struttura scolastica che influenzano direttamente il microclima ed indirettamente le potenziali fonti di inquinamento indoor,
- il **microclima** (temperatura, umidità, ventilazione e ricambi d'aria),
- le **fonti inquinanti indoor** di natura biologica (es. acari, muffe) e chimica-fisica (es. COV, PM),
- gli **inquinanti outdoor** che penetrano nell'aria indoor (es. particolato, NOx, benzene, IPA e ozono).



Figura 2 - Parametri che influenzano la qualità dell'aria nelle scuole - Fonte: GARD-I (Baglioni et al., 2010)

Stato dell'edificio e microclima interno

Nelle strutture scolastiche italiane ed europee sono state riscontrate evidenti carenze progettuali, architettoniche, edilizie e manutentive degli edifici e degli impianti o da carenze nella gestione igienica delle scuole oltre a gravi carenze comportamentali (es. fumo di sigaretta da parte di docenti e studenti, la scarsa cura dell'igiene dei locali e la scarsa aerazione dei locali, etc.).

Circa un terzo delle scuole esaminate nello studio HESE aveva più di 50 anni; il 40% delle scuole italiane è stato costruito prima degli anni 60'. In questi edifici si riscontrano facilmente problemi di **ponti termici**, legati a cattivo isolamento, deterioramento dei materiali, infiltrazioni di acqua: questo causa l'abbassamento della temperatura superficiale del muro e, in presenza di elevati tassi di umidità, provoca la proliferazione di muffe.

Dimensioni dell'aula e numero degli scolari sono parametri che influenzano la concentrazione di inquinanti e il microclima interno. Affinché le impurità non si accumulino nel locale, l'aria satura e «viziata» deve essere espulsa tramite il ricambio di aria e sostituita con l'equivalente quantità di aria fresca. Nelle aule senza ventilazione meccanica, l'altezza dei battenti delle finestre può influenzare il tasso di ricambio dell'aria: maggiore è l'altezza dei battenti, maggiore è il volume di aria che entra nel locale.

I risultati del progetto SEARCH II¹ (School Environment and Respiratory Health of Children) evidenziano che il sovraffollamento nelle aule è causa di una cattiva IAQ: aumentare il tasso di ricambio di aria, arieggiando durante le pause e tenendo aperte le finestre durante l'orario di insegnamento può migliorare la qualità dell'aria e diminuire la concentrazione di CO₂.

2.3 Fonti di inquinanti negli ambienti scolastici (indoor, outdoor, ground)

Il carico ambientale delle aule è rappresentato da:

- sostanze derivanti dal metabolismo come l'anidride carbonica (CO₂) e numerosi composti organici, virus e batteri liberati nell'aria attraverso la respirazione e la traspirazione da scolari e insegnanti, oltre che da sostanze derivanti dagli indumenti e dai prodotti per la cura del corpo,
- inquinanti derivanti da fonti interne come materiali edili, arredi, materiali scolastici, prodotti per la pulizia, carenze nella pulizia e manutenzione delle strutture scolastiche e dei loro impianti HVAC,
- sostanze inquinanti provenienti dall'esterno (es. causate da vicinanza di strade trafficate)

L'agenzia per la protezione ambientale americana (US EPA), nelle linee guida per la qualità dell'aria nelle scuole (*"Indoor Air Quality Tools for Schools"* - United States Environmental Protection Agency, 2015), identifica le tipiche fonti di inquinanti interni negli edifici scolastici, come ad esempio l'arredamento interno e i materiali da costruzione, i prodotti per la pulizia e l'attrezzature da ufficio, pavimentazione in plastica (PVC) e vernici resistenti all'acqua. Molte anche le fonti outdoor che entrano per infiltrazione: scuole costruite vicino a strade con traffico intenso o in aree fortemente inquinate da altre fonti presentano alte concentrazioni di inquinanti.

Fonte di inquinanti possono essere anche l'acqua e il suolo (ad esempio gli inquinanti dell'aria provenienti attraverso la fornitura di acqua, radon e suoli contaminati ecc.). L'aria e l'acqua provenienti da aree limitrofe o sotterranee entrano nell'edificio attraverso il sistema di ventilazione o per infiltrazione (permeabilità dell'involucro dell'edificio, come le fondamenta, il tetto, i muri, porte e finestre). Si può concludere quindi che anche lo stato di costruzione dell'edificio scolastico (ad esempio età, danni a pareti e soffitti a seguito di infiltrazioni d'acqua, mantenimento della struttura, costruzione ecc.) influenza la qualità dell'aria interna.

L'ubicazione dell'edificio scolastico vicino a strade trafficate o zone industriali determina una maggiore concentrazione nell'aria interna di inquinanti quali PM₁₀, NO₂ e particelle ultrafini (HESE, 2006), a causa dell'alta concentrazione di queste sostanze nell'aria esterna, prodotte principalmente dal traffico veicolare e dalle attività urbane e industriali. La Figura 3 mostra la correlazione fra la concentrazione degli inquinanti all'interno e all'esterno delle aule scolastiche: si può notare che la formaldeide, principalmente legata a fonti interne, presenta una concentrazione maggiore all'interno delle classi, mentre il biossido di azoto, prodotto principalmente dalla combustione, è presente in concentrazioni maggiori all'esterno delle scuole.

¹ Progetto promosso dal Ministero dell'Ambiente, della Tutela del Territorio e del Mare, che ha coinvolto 101 scuole di 10 Paesi Europei

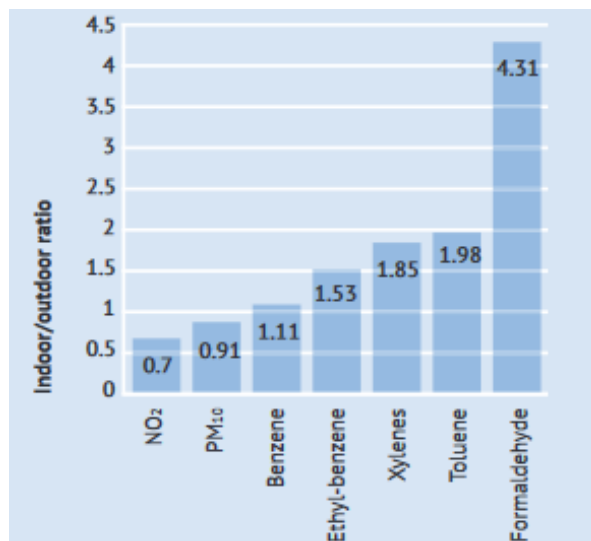


Figura 3 – Correlazione fra la concentrazione di inquinanti misurata all'interno delle classi e all'esterno della scuola – risultati del progetto SEARCH (Kephalopoulos, Csobod, & de Oliveira Fernandes, 2014)

In Tabella 1 sono riassunte le principali fonti di inquinanti dell'aria indoor delle scuole emerse frutto dell'analisi svolta per l'elaborazione del Capitolo 3.

FONTI	INQUINANTI
FONTI ESTERNE	
Fonti varie esterne	Pollini, polvere, spore, muffa, O3
Da emissioni industriali/da traffico veicolare	PM, PAH, NOx, SOx, VOC (Benzene)
Fonti sotterranee / Perdite da serbatoi sotterranei di stoccaggio	Radon, Pesticidi
Giardino sabbioso	VOC
ATTREZZATURE EDILI, COMPONENTI E ARREDAMENTI	
Attrezzature per il riscaldamento, la ventilazione e il condizionamento dell'aria (HVAC)	Muffa, polvere, legionella, agenti biologici, batteri
Impianto di generazione (combustione)	CO2, CO, PM, PAH, NOx
Scarichi a galleggiante asciutti che permettono il passaggio dei gas malsani	Gas tossici, agenti biologici
Materiali sporchi o danneggiati da acqua	Muffe, Acari, Allergeni
Arredi e pavimentazioni	VOC, Formaldeide, Benzene, muffe
Materiali da costruzione	VOC, Formaldeide, Composti inorganici, PM, Fibre minerali
Collanti, pitture, sigillanti, adesivi, vernici	VOC: Formaldeide, Benzene
Vernici resistenti all'acqua	Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene
Pannelli fonoassorbenti, materiali isolanti	Formaldeide
Tessuti (es. tende)	Formaldeide, Acari della polvere
ALTRE POTENZIALI FONTI INTERNE	
Emissioni da attrezzature per ufficio come stampanti e fotocopiatrici	VOC, ozono, PM
Attrezzature da laboratorio	Inquinanti specifici a seconda del tipo di laboratorio
Giochi e peluche	Acari della polvere,
Prodotti per le pulizie/deodoranti per ambienti, prodotti per disinfestazioni	VOC, Pesticidi, PM, IPA
Pennarelli a secco e enne analoghe	VOC: Formaldeide
Occupanti (da respirazione, indumenti, ecc)	CO2, agenti biologici (virus e batteri), PM
Presenza di fumatori	VOC, IPA
Insetti e altri parassiti	Agenti biologici, allergeni

Tabella 1 – Tipiche fonti di inquinanti interni negli edifici scolastici - Rielaborazione dei dati forniti dalle Linee Guida per la Qualità dell'Aria nelle Scuole (United States Environmental Protection Agency, 2015)

3 Caratteristiche e concentrazione degli inquinanti indoor delle scuole

Le linee guida per un ambiente scolastico sano in Europa (Kephelopoulos, Csobod, Bruinen de Bruin, & de Oliveira Fernandes, 2014) riportano i principali agenti inquinanti presenti all'interno delle scuole monitorate in 23 Paesi europei, nell'ambito del progetto SINPHONIE², e in 10 Paesi europei, fra cui anche l'Italia, nell'ambito del progetto SEARCH³. In Tabella 2 sono riportati i principali agenti inquinanti riscontrati all'interno delle scuole europee, suddivisi in due categorie: fattori di rischio fisico/chimico (particelle organiche, inorganiche, ecc) e fattori di rischio microbiologico (virus, batteri, agenti patogeni, allergeni, ecc).

Fattori di stress fisico e chimico	Fattori di stress microbiologico
<ul style="list-style-type: none"> • Benzene • Tricloroetilene • Tetracloroetilene • Formaldeide • Naftalene • Benzo(a)pirene • a-pinene • d-limonene • PM2.5 • PM10 • NO2 • Ozono • CO • Radon 	<ul style="list-style-type: none"> • Endotossine • Specifici gruppi fungini e batterici: <ul style="list-style-type: none"> • genere Penicillium/Aspergillus • Cladosporium herbarum • Aspergillus versicolor • Alternaria alternata • Trichoderma viride • Streptomyces spp. • Mycobacterium spp. • Allergeni <ul style="list-style-type: none"> • Acari della polvere • Allergeni derivati da cavallo, gatto e cane

Tabella 2 – Principali agenti inquinanti presenti all'interno delle scuole europee – progetto SINPHONIE (Kephelopoulos, Csobod, & de Oliveira Fernandes, 2014)

In questo capitolo verranno mostrate le caratteristiche chimico-fisiche, il livello di tossicità e pericolosità, le fonti e la concentrazione degli inquinanti che si possono trovare negli ambienti scolastici. I dati e le informazioni presenti in questo documento sono stati tratti da paper/documenti relativi a campagne di misura negli ambienti scolastici europei condotti nell'ambito di progetti/studi europei quali SEARCH, SINPHONIE, HESE, oltre a INDOOR, SCHOOL OF THE FUTURE, INDEX and EXPAH.

Gli inquinanti saranno esposti secondo la classificazione di Figura 1, proposta da Annex68 (Marc O. Abadie, 2017). I livelli guida di concentrazione degli inquinanti fanno riferimento alle linee guida dell'Organizzazione Mondiale della Sanità per la qualità dell'aria indoor degli edifici in generale.

3.1 Composti inorganici

Caratteristiche: Esempi tipici di inquinanti inorganici nell'aria interna sono gli ossidi di azoto (NO, NO₂), l'ozono (O₃) e il monossido di carbonio (CO).

Fonti:

² Il progetto SINPHONIE (Inquinamento Scolastico Indoor e Salute - Osservatorio Network in Europa) è stato finanziato dal Parlamento Europeo e svolto nell'ambito di un contratto con la Direzione Generale della Commissione europea per la Salute e i Consumatori (DG SANCO).

³ Progetto promosso dal Ministero dell'Ambiente, della Tutela del Territorio e del Mare, che ha coinvolto 101 scuole di 10 Paesi Europei

- Aria Esterna: entrano negli edifici nel processo di aerazione e ventilazione o per infiltrazione d'aria attraverso l'involucro dell'edificio.
- Indoor: questi composti possono anche essere emessi direttamente negli ambienti interni dai processi di combustione (fumo, riscaldatori, incenso, cottura) o da stampanti e fotocopiatrici.

3.1.1 Ossidi di azoto (NO_x)

<i>Caratteristiche</i>	I due ossidi di azoto più diffusi sono il diossido di azoto (NO ₂) e l'ossido di azoto (NO). Entrambi sono gas tossici con NO ₂ che è un ossidante altamente reattivo e corrosivo. NO reagisce gradualmente con l'ossigeno presente nell'aria per formare NO ₂ .
<i>Fonti</i>	Inquinamento dell'aria esterna, derivante principalmente dai processi di combustione (centrali termoelettriche, riscaldamento, traffico). Altre fonti indoor sono le stampanti e le fotocopiatrici, cucine didattiche (con fornello a gas), laboratori di chimica-fisica (bruciatore Bunsen)
<i>Effetti</i>	Il diossido di azoto è un gas irritante per l'apparato respiratorio e per gli occhi. Se inalato in quantità elevate può causare bronchiti fino anche a edemi polmonari e decesso.
<i>Standard/Linee guida</i>	NO ₂ : 40 µg/m ³ (media annuale e settimanale) e 200 µg/m ³ (1 ora) - Linee guida sulla qualità dell'aria interna OMS 2010 e aggiornamento UE-INDEX 2009.
<i>Livelli di esposizione nelle scuole europee</i>	Nel progetto SINPHONIE solo in pochissime aule è stato riscontrato un livello di esposizione critico (superiore agli standard OMS). Nell'ambito del progetto InAirQ, la concentrazione media annua di NO ₂ monitorata in 44 scuole italiane nel 2008 è risultata pari a 19 µg/m ³ . Nel progetto SEARCH sono stati misurati livelli di concentrazione dell'NO ₂ per 4 consecutivi e sono stati riscontrati valori medi per Paese compresi fra 12.2 e 22.1 µg/m ³ e valori massimi inferiori ai 50 µg/m ³ .

3.1.2 Ozono (O₃)

<i>Caratteristiche</i>	Presenta un tempo di dimezzamento breve (circa 30 minuti). Si origina principalmente nelle reazioni di fotossidazione dalla luce del sole o in presenza di forti campi elettrici o di lampade a luce UV.
<i>Fonti</i>	Le fonti principali indoor sono fotocopiatrici e stampanti laser o dispositivi per la sanificazione delle macchine di ventilazione. L'ozono entra anche per infiltrazione dall'esterno, specialmente in estate.
<i>Effetti</i>	In concentrazioni superiori a 0,05 ppm provoca secchezza delle mucose, mal di testa e, per valori oltre 1,7 ppm perfino edema polmonare.
<i>Standard/Linee guida</i>	100 µg/m ³ (8 h) – OMS 2005, valido sia per l'ambiente outdoor che indoor.
<i>Livelli di esposizione nelle scuole europee</i>	Nelle scuole SINPHONIE, i valori di ozono variavano da 0 a 141 µg/m ³ .

3.1.3 Monossido di carbonio (CO)

<i>Caratteristiche</i>	Gas incolore, prodotto della combustione incompleta.
<i>Fonti</i>	Inquinamento da traffico veicolare e sistemi di riscaldamento. Fonti interne: cucine didattiche
<i>Effetti</i>	A livelli di esposizione bassi, può provocare una ridotta capacità di movimento e problemi cardiovascolari, congestizia, ictus, asma, tubercolosi e polmonite (OMS, 2010). Concentrazioni elevate sono causa frequente di mortalità.
<i>Standard/Linee guida</i>	100 mg/m ³ (per 15 min di esposizione), 60 mg/m ³ (30 min), 35 mg/m ³ (1 h),

	10 mg/m ³ (8 h) e 7 mg/m ³ (24 h) – OMS IAQ 2010.
<i>Livelli di esposizione nelle scuole europee</i>	Nelle scuole SINPHONIE, in tutti i casi tranne uno, i bambini sono stati esposti a livelli sotto al valore guida di 7 mg/m ³ (24 h).

3.2 Radon (Rn)

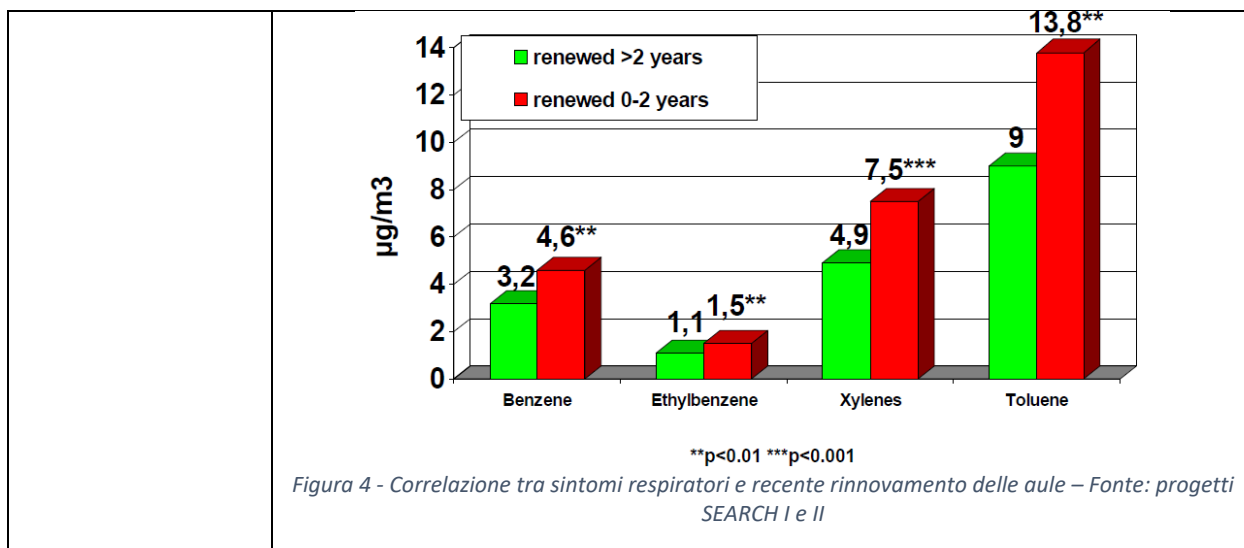
<i>Caratteristiche</i>	Il radon è un gas nobile di origine naturale incolore e radioattivo, prodotto di disintegrazione dell'uranio
<i>Fonti</i>	<p>Presente nella crosta terrestre, il Radon penetra negli edifici attraverso crepe, fessure o punti aperti delle fondamenta.</p> <p>I fattori che incidono sulla concentrazione del Radon sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Condizioni dell'edificio: il Radon può penetrare attraverso intercapedini, crepe, fori di passaggio dei cavi. Fondamenta e muratura devono essere in grado di schermare la diffusione del Radon. - Permeabilità e concentrazione del Radon nel terreno: le scuole ubicate in zone con alta concentrazione di Radon nel terreno sono particolarmente interessate dal fenomeno. - Ricambi d'aria: negli ambienti scolastici chiusi, soprattutto nei locali a contatto con il terreno, il radon può concentrarsi raggiungendo concentrazioni anche molto elevate in caso di ridotto ricambio d'aria.
<i>Effetti</i>	I suoi decadimenti radiativi, depositandosi nell'epitelio bronchiale, possono provocare malattie cancerogene che colpiscono l'apparato respiratorio. Il Radon è stato classificato come agente cancerogeno del gruppo 1 (IARC, 1988).
<i>Parametri</i>	<p>La concentrazione è influenzata da:</p> <ul style="list-style-type: none"> - differenza di temperatura. Se al suo interno la temperatura risulta maggiore di quella esterna (cosa che avviene durante la notte o nei mesi invernali), si crea una situazione di depressione che favorisce la risalita dei gas (e quindi del radon) dal sottosuolo attraverso piccole crepe, fessure e pori (effetto camino); - differenza di pressione: un abbassamento di pressione all'interno di un edificio può determinare l'ingresso del radon nello stesso; - ventilazione: in assenza o scarsità di scambio d'aria con l'esterno, la concentrazione di radon può essere significativa.
<i>Standard/Linee guida</i>	A livello residenziale il livello di riferimento in Alto Adige è 200 Bq/m ³ (per edifici nuovi) e 400 Bq/m ³ (per edifici esistenti) mentre in Svizzera è 300 Bq/m ³ (sia per edifici nuovi che per edifici esistenti) ⁴ . L'OMS consiglia di rimanere sotto i 100 Bq/m ³ . Per i bambini è consigliato un livello di esposizione massimo pari a 167 Bq/m ³ (OMS).
<i>Livelli di esposizione nelle scuole europee</i>	I risultati delle misurazioni di radon nelle scuole SINPHONIE mostrano valori tra 0 e 9186 Bq/m ³ (valore mediano 100.9 Bq/m ³) con livelli significativamente più alti nei paesi europei meridionali e centro-orientali rispetto ai paesi settentrionali e occidentali. Il 50% dei bambini è stato esposto a più di 100 Bq/m ³ .

3.3 Composti organici volatili (VOC)

<i>Caratteristiche</i>	I VOC sono inquinanti gassosi che possono provenire dall'esterno o da fonti interne: idrocarburi alifatici, aromatici e clorurati, aldeidi (es. formaldeide), terpeni, alcoli, eteri e chetoni, BTEX (benzene, toluene, etilbenzene e xilene). Sono stati identificati e
------------------------	--

⁴ Nuova ordinanza federale ddal 1° di gennaio 2018 (<https://www.admin.ch/opc/it/classified-compilation/20163016/index.html#id-4-3>)

	<p>classificati numerosi composti organici in fase gassosa presenti nell'aria degli ambienti confinati:</p> <ul style="list-style-type: none"> - VVOC ("Very volatile organic compounds"), composti molto volatili. - VOC ("Volatile organic compounds"), composti organici volatili in senso stretto. - SVOC ("Semivolatile organic compounds"), composti organici semivolatili. - POM ("Particulate organic matter"), composti associati con il particolato.
<i>Fonti</i>	<p>Mobili realizzati con prodotti in legno pressato (banchi, cattedre e armadi), pannelli isolanti o fonoassorbenti in schiuma di urea-formaldeide (UFFI), pavimenti in plastica, tende resistenti, moquettes e rivestimenti, altri tessuti e colle sono fonti di aldeidi che possono determinare continue emissioni nell'arco di settimane o mesi (risultati delle analisi effettuate analizzando la concentrazione di VOC in scuole e uffici in Europa (Geiss et al., 2011)).</p> <p>L'esanale (aldeide) ad esempio è prodotto dalla reazione chimica degli ossidanti nell'aria con l'acido linoleico derivante dai prodotti di legno (Svedberg et al.).</p> <p>L'emissione di VOC è più alta all'inizio della vita del prodotto e tende a diminuire notevolmente in tempi abbastanza brevi (da una settimana per i prodotti umidi, come vernici e adesivi, a sei mesi per altri composti chimici).</p> <p>La presenza di fumatori all'interno degli ambienti è anch'essa fonte di VOC.</p>
<i>Effetti</i>	<p>I VOC possono causare effetti che vanno dal disagio sensoriale (sinusite, sfoghi della pelle) a gravi alterazioni dello stato di salute (ad esempio il benzene è considerato un inquinante cancerogeno).</p>
<i>Parametri termogrometrici</i>	<p>Solitamente si riscontra una maggiore concentrazione di VOC durante la stagione invernale, a causa di un minor tasso di ricambio di aria (Geiss et al., 2011). Aldeidi e terpeni invece sono maggiormente presenti durante la stagione estive, in quanto reagiscono rapidamente con gli ossidanti presenti nell'aria, come l'ozono, che penetra dall'aria esterna ed è molto più abbondante nella stagione calda a causa della maggiore attività fotochimica.</p>
<i>Standard/Linee guida</i>	<p>UE: TVOC (VOC totali) = 200 – 3000 µg/m³ (OMS)</p>
<i>Livelli di esposizione nelle scuole europee</i>	<p>La campagna di misura condotta da INAIL a Roma in 4 edifici con ventilazione naturale ha rilevato livelli di TVOC al di sotto dei valori medi di letteratura: inferiore a 0,1 ppm. Sono state riscontrate concentrazioni più elevate di TVOC (> 200 µg·m⁻³) nelle scuole di recente costruzione o ristrutturazione (<1 anno), come ad esempio in 2 scuole Minergie (con ventilazione meccanica) di nuova costruzione in legno (Canonica, 2014).</p> <p>Maggiori concentrazioni di VOC vengono riscontrate anche nelle aule che vengono pulite la mattina invece che la sera. Le concentrazioni di VOC significativamente più elevate nelle classi rinnovate da meno di 2 anni. (risultati del progetto SEARCH)</p>



3.3.1 BTEX

3.3.1.1 BTEX: Benzene

<i>Caratteristiche</i>	Il benzene è un liquido incolore molto volatile anche a basse temperature. È ampiamente usato nell'industria chimica come solvente.
<i>Fonti</i>	Pitture, vernici e lacche (mobili e materiali edili), pavimenti in gomma e PVC, materiali edili e detergenti. Fonti del benzene sono anche i gas di scarico degli autoveicoli.
<i>Effetti</i>	Il benzene è considerato un inquinante cancerogeno che può provocare danni al sistema nervoso centrale.
<i>Standard/Linee guida</i>	5 µg/m ³ (media annuale) - valore limite UE della direttiva sulla qualità dell'aria (2008/EC/50). Non esiste un valore limite per l'OMS in quanto il benzene è cancerogeno: l'OMS fa presente che l'unità di rischio di leucemia per la concentrazione in aria di 1 µg/m ³ è 6*10 ⁻⁶ .
<i>Livelli di esposizione nelle scuole europee</i>	Circa il 25% degli scolari è esposto a livelli superiori a 5 µg/m ³ con percentuali più elevate nei paesi dell'Europa centro-orientale (Fonte: progetto SINPHONIE). Nell'ambito del progetto InAirQ, la concentrazione media annua di Benzene monitorata in 44 scuole italiane nel 2008 è risultata pari a 1.95 µg/m ³ . In alcuni studi condotti in ambienti scolastici europei hanno rilevato che i livelli di concentrazioni di benzene delle scuole site vicino ad autostrade (3.2 µg/m ³) superano di ben 3 volte i livelli di concentrazione medie rilevati nelle altre scuole (0.98 µg/m ³) (Sarigiannis, Karakitsios, Gotti, Liakos, & Katsoyiannis, 2011). Progetto Indoor "Studio sul comfort e sugli inquinanti fisici e chimici nelle scuole" (regione Toscana, 2006): Si è registrata un'associazione statisticamente significativa tra il benzene presente all'interno delle aule e l'intensità di traffico automobilistico ed una buona correlazione tra benzene interno ed esterno nelle 24 ore. SEARCH: Concentrazioni medie di benzene misurate nell'arco di quattro giorni nelle aule variano tra 2.0 e 6.3 µg/m ³ .

3.3.1.2 BTEX: Toluene

<i>Caratteristiche</i>	È un liquido incolore utilizzato come solvente
<i>Fonti</i>	Pitture, vernici, inchiostri, detergenti, colle, lacche, rivestimenti

	Pavimenti in plastica e mobili nuovi (<1anno)
<i>Effetti</i>	Il toluene può provocare irritazioni delle mucose, sinusite e agisce sul sistema nervoso centrale.
<i>Standard/Linee guida</i>	260 µg/m ³ – OMS (2000) 190 µg/m ³ – VME (Svizzera)
<i>Livelli di esposizione nelle scuole europee</i>	Nell'ambito del progetto InAirQ, la concentrazione media annua di Toluene monitorata in 44 scuole italiane nel 2008 è risultata pari a 5.01 µg/m ³ . SEARCH: Concentrazioni medie di toluene misurate nell'arco di quattro giorni nelle aule variano tra 4.6 e 29.0 µg/m ³ , con valori più elevati nelle aule più affollate (<2m ² /persona)

3.3.1.3 BTEX: Etilbenzene

<i>Caratteristiche</i>	È un liquido incolore utilizzato come solvente
<i>Fonti</i>	Tappeti, Vernici resistenti all'acqua e mobili nuovi (<1anno)
<i>Effetti</i>	Allergie
<i>Standard/Linee guida</i>	442 µg/m ³ – 2000/39/CE
<i>Livelli di esposizione nelle scuole europee</i>	Nell'ambito del progetto InAirQ, la concentrazione media annua di Toluene monitorata in 44 scuole italiane nel 2008 è risultata pari a 5.01 µg/m ³ . SEARCH: Concentrazioni medie di etilbenzene misurate nell'arco di quattro giorni nelle aule variano tra 1.2 e 2.0 µg/m ³ , con valori più elevati nelle aule con vernici resistenti all'acqua e mobili nuovi

3.3.1.4 BTEX: Xilene

<i>Caratteristiche</i>	È un liquido incolore utilizzato come solvente
<i>Fonti</i>	Tappeti, Vernici resistenti all'acqua e mobili nuovi (<1anno) Prodotti per la pulizia
<i>Effetti</i>	Allergie
<i>Standard/Linee guida</i>	870 µg/m ³ (1 anno) e 4800 µg/m ³ (24h) – OMS (2010)
<i>Livelli di esposizione nelle scuole europee</i>	Nell'ambito del progetto InAirQ, la concentrazione media annua di Toluene monitorata in 44 scuole italiane nel 2008 è risultata pari a 5.01 µg/m ³ . SEARCH: Concentrazioni medie di etilbenzene misurate nell'arco di quattro giorni nelle aule variano tra 5 e 8 µg/m ³ , con valori massimi che oscillano fra 16 e 70 µg/m ³ (misurati nelle scuole ungheresi).

3.3.2 d-limonene

<i>Caratteristiche</i>	È utilizzato come agente aromatizzante in numerosi prodotti di consumo utilizzati in ambienti interni.
<i>Fonti</i>	Detergenti e prodotti per la pulizia
<i>Effetti</i>	I potenziali rischi dell'esposizione a d-limonene sono irritazione degli occhi e delle vie respiratorie, specie in presenza di O ₃ .
<i>Standard/Linee guida</i>	Il progetto EU-INDEX raccomanda un limite di esposizione di 450 µg/m ³ .
<i>Livelli di esposizione nelle scuole europee</i>	Le concentrazioni interne di d-limonene nelle scuole SINPHONIE variavano da 0 a 671 µg/m ³ , con livelli significativamente più elevati nei paesi orientali che in quelli meridionali e occidentali ed erano molto bassi nei paesi settentrionali. La maggioranza degli studenti è stata esposta a livelli molto bassi di d-limonene (inferiore a 100 µg/m ³).

3.3.3 Tricloroetilene

<i>Caratteristiche</i>	Il tricloroetilene (TCE) è un solvente industriale ampiamente utilizzato.
<i>Fonti</i>	È contenuto nei mordenti per legno, vernici, prodotti per il finissaggio, adesivi, bianchetto, sverniciatori e alcuni detergenti.
<i>Effetti</i>	La IARC ha classificato il TCE come probabile cancerogeno per l'uomo (gruppo 2A) sulla base di elementi di prova sufficienti negli animali e limitati elementi di prova nell'uomo.
<i>Standard/Linee guida</i>	Sulla base delle linee guida OMS per la qualità dell'aria interna (2010), il rischio unitario stimato è di 4.3×10^{-7} per $\mu\text{g}/\text{m}^3$
<i>Livelli di esposizione nelle scuole europee</i>	Nelle scuole SINPHONIE è stata osservata una vasta gamma di valori (da 0 a 126 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) con livelli di TCE interno significativamente più bassi nei paesi occidentali e settentrionali rispetto a quelli meridionali e orientali. Solo il 10% dei bambini è stato esposto a più di 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ di TCE nelle scuole

3.3.4 Tetracloroetilene

<i>Caratteristiche</i>	Il tetracloroetilene (PCE) (numero di registro CAS 127-18-4; C_2Cl_4 ; peso molecolare 165.83) è un liquido incolore facilmente volatile con un odore simile all'etere.
<i>Fonti</i>	È presente negli adesivi, profumi, smacchiatori, finiture in tessuto, idrorepellenti, detergenti per legno e tessuti lavati a secco.
<i>Effetti</i>	L'esposizione a PCE può colpire il sistema nervoso centrale, occhi, reni, fegato, polmoni, mucose e pelle. Il PCE è classificato dalla IARC come cancerogeno di gruppo 2A (probabilmente cancerogeno per l'uomo).
<i>Standard/Linee guida</i>	L'OMS raccomanda un valore limite di esposizione annuale pari a 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
<i>Livelli di esposizione nelle scuole europee</i>	Scuole SINPHONIE: Nessuno dei bambini è stato esposto a livelli di PCE superiori a 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; il livello massimo misurato: 81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Solo il 10% dei bambini è stato esposto a livelli di PCE superiori a 3.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.3.5 Formaldeide

<i>Caratteristiche</i>	La formaldeide è un composto organico volatile (VOC) tra i più diffusi e noti, gas incolore con un odore acre ed irritante.
<i>Fonti</i>	È ampiamente usato nell'industria chimica, nella fabbricazione di oggetti di design d'interni e nei prodotti per la pulizia. Molti prodotti della costruzione contengono formaldeide, in particolare viene utilizzato per la produzione di resine, utilizzate a loro volta per la produzione di truciolato e materiali a base di legno, colle, prodotti isolanti, ecc. Può essere rilasciato anche da pennarelli indelebili. A causa delle sue proprietà fungicide e battericide, è anche usato come disinfettante e conservante. La formaldeide viene rilasciata anche a distanza di molti anni dai collanti in cui è presente. L'Agenzia Provinciale per l'Ambiente di Bolzano ha analizzato i livelli di concentrazione della formaldeide in due scuole materne del comune di Bolzano, per analizzate le possibili fonti principali di emissione: togliendo alcuni elementi fonoassorbenti da un'aula, è stato evidenziato un abbassamento importante dei valori di formaldeide ⁵ .

⁵ http://www.comune.bolzano.it/stampa_context.jsp?area=295&ID_LINK=426&page=13009

<i>Effetti</i>	La formaldeide può causare problemi di salute quali: irritazione delle mucose degli occhi, irritazione delle prime vie respiratorie, irritazione della pelle, mal di testa, stanchezza e indisposizione; in seguito all'esposizione per mesi o anni può causare diminuzione della funzionalità polmonare e aumento del rischio di infezioni croniche delle vie respiratorie, fino alla comparsa dei tumori nasofaringei: secondo l'Agencia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) vi è sufficiente evidenza che la formaldeide sia cancerogena per l'uomo ed è stata classificata come cancerogeno di categoria 1B (cioè una sostanza nota o presunta avere potenziale cancerogeno mutageno per gli esseri umani).
<i>Parametri termoigrometrici</i>	La concentrazione di formaldeide in una stanza è correlata alla temperatura e umidità dell'aria (maggiore è la temperatura, maggiore è la formaldeide rilasciata dai materiali): l'incremento della temperatura da 14°C a 35°C o l'aumento dell'umidità relativa dal 30% al 70% aumenta il rilascio di formaldeide dai manufatti in truciolato e quindi aumenta la sua concentrazione in ambiente indoor. Lo stesso fenomeno avviene anche per altri agenti inquinanti di origine chimica.
<i>Standard/Linee guida</i>	100 µg/m ³ (media sui 30 minuti) o 0,1 ppm – Fonte: Linee guida OMS 2010 sulla IAQ e aggiornamento UE-INDEX 2009.
<i>Livelli di esposizione nelle scuole europee</i>	<p>I risultati delle misure all'intero delle scuole SINPHONIE vanno da 1.3 a 66.2 µg/m³, con grandi differenze tra i paesi partecipanti.</p> <p>Nell'ambito del progetto InAirQ, la concentrazione media annua di Formaldeide monitorata in 44 scuole italiane nel 2008 è risultata pari a 33.07 µg/m³.</p> <p>È stato rilevato che la concentrazione di Formaldeide in alcune scuole aumenta durante la stagione invernale a causa della diminuzione dei ricambi d'aria (in assenza di ventilazione meccanica controllata) (Bernasconi & Valsangiacomo, 2014).</p> <p>Scuole con maggiori concentrazioni di formaldeide sono quelle costruite nei primi anni '70 e rinnovate negli anni '90 (Canonica, 2014).</p> <p>SEARCH: Concentrazioni medie di formaldeide misurate nell'arco di quattro giorni nelle aule variano tra 2 e 33 µg/m³.</p> <p>All'interno degli edifici scolastici italiani, le concentrazioni di formaldeide sono risultate più elevate rispetto alla media delle altre scuole europee, pur rimanendo lontane dai livelli di pericolosità indicati dall'OMS (studio SEARCH).</p>

3.4 Idrocarburi aromatici policiclici (PAH)

<i>Caratteristiche</i>	<p>I PAH (Polycyclic aromatic hydrocarbons) sono un grande gruppo di composti organici costituiti da anelli di benzene, molto diffusi nell'ambiente a causa delle loro proprietà chimico-fisiche che permettono di legarsi ad altre particelle aerodisperse (PM) oppure di diffondersi in forma gassosa nell'aria. La loro concentrazione dipende dalle condizioni atmosferiche e dai parametri di combustione.</p> <p>I principali PAH identificati a livello internazionale sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • naftalene, • acenaftilene, • acenaftene, • fluorene, • fenantrene, • antracene, • fluorantene, • pirene, • benz (a) antracene, • crisene,
------------------------	--

	<ul style="list-style-type: none"> • benzo (b) fluorantene, • benzo (k) fluorantene, • benzo (a) pirene, • dibenz (a, h) antracene, • benzo (ghi) perilene, • indeno (1,2,3-cd) pirene. <p>Composti con 2-3 anelli aromatici (naftalene, acenaftilene, acenaftene, fluorene, fenantrene e antracene) si trovano prevalentemente nella fase gassosa in aria mentre i composti con 5 e più anelli [benzo (b) fluorantene, benzo (j) fluorantene benzo (k) fluorantene, benzo (a) pirene, dibenzo (ah) antracene, dibenzo (al) pirene, benzo (ghi) perilene, indeno (123-cd) pirene] sono quasi completamente legati alle particelle; composti con 4 anelli, cioè fluorantene, pirene, benz (a) antracene e crisene, sono distribuiti tra entrambe le fasi (Oliveira, Slezakova, Delerue-Matos, Pereira, & Morais, 2019).</p>
<i>Fonti</i>	<p>Prodotti dalla combustione e dalla pirolisi di prodotti organici: fumo di tabacco, gas di scarico di automobili e sistemi di riscaldamento sono tra le principali fonti. Le emissioni di naftalene provengono principalmente dagli scarichi degli autoveicoli, ma anche da deodoranti per servizi igienitici e insetticidi.</p> <p>La principale fonte degli idrocarburi policiclici aromatici derivano da fonti esterne: infatti nelle scuole europee analizzate (Oliveira et al., 2019) il rapporto fra concentrazione indoor e outdoor dei composti cancerogeni legati al PM varia tra 0,08 per il benz(a)antracene (maggiore la concentrazione outdoor) e 0,87 per il naftalene (alta la concentrazione indoor).</p>
<i>Effetti</i>	<p>Alcuni di questi composti hanno proprietà tossiche, mutagene e cancerogene. L'agenzia internazionale per la ricerca sul cancro (IARC) ha classificato il benzo (a) pirene come cancerogeno per l'uomo (gruppo I, IARC, 2010), benz (a) antracene, dibenzo (a, l) pirene e dibenz (a, h) antracene come probabile cancerogeno (gruppo 2A; IARC, 2010), e naftalene, crisene, benzo (b) fluorantene, benzo (j) fluorantene, benzo (k) fluorantene e indeno (1,2,3-c, d) pirene come possibile cancerogeni (gruppo 2B, IARC, 2002, 2010).</p>
<i>Standard/Line e guida</i>	<p>L'OMS sostiene che non può essere determinato un valore limite e che tutte le esposizioni indoor devono essere considerate rilevanti per la salute [WHO, 2010]; fa presente che l'unità di rischio per il cancro al polmone è pari a $8,7 \cdot 10^{-5}$ per ng/m³ di benzo[a]pirene. Si possono però considerare validi i seguenti valori limite:</p> <p>Naftalene: 10 µg/m³ (OMS) Benzo(a)pirene: 1,0 ng/m³.</p>
<i>Livelli di esposizione nelle scuole europee</i>	<p>Il 74% degli studi nelle scuole sono stati quasi esclusivamente dedicati alla valutazione dei livelli di PAH nelle frazioni PM₁₀ e/o PM_{2.5}, determinati mediante campionamento attivo di almeno 8 ore. Questo perché i PAH con maggiori proprietà tossiche e cancerogene (note, possibili/probabili) sono prevalentemente presenti nella fase particellare (Krugly et al., 2014), in particolare nelle frazioni più fini di PM (PM₁ e PM₂) e quindi più pericolose per la salute dei bambini, in quanto possono raggiungere i polmoni ed entrare all'interno del sistema circolatorio.</p> <p>Alcuni autori però sottolineano che i PAH aerodispersi in fase gassosa sono presenti in concentrazioni significativamente più elevate rispetto alle frazioni di PM (Dat and Chang, 2017; Eiguren-Fernandez et al., 2007; Oliveira et al., 2015a, 2015b, 2016a, 2017b), fino a raggiungere l'81,8-97,8% degli ΣPAH totali all'interno e il 77,5-99,6% all'esterno delle scuole.</p>

Le concentrazioni di PAH (Σ PAHs) e di PAH cancerogeni (Σ PAHscarc e singoli inquinanti) nell'aria interna agli edifici scolastici europei sono riportate in Figura 5 e

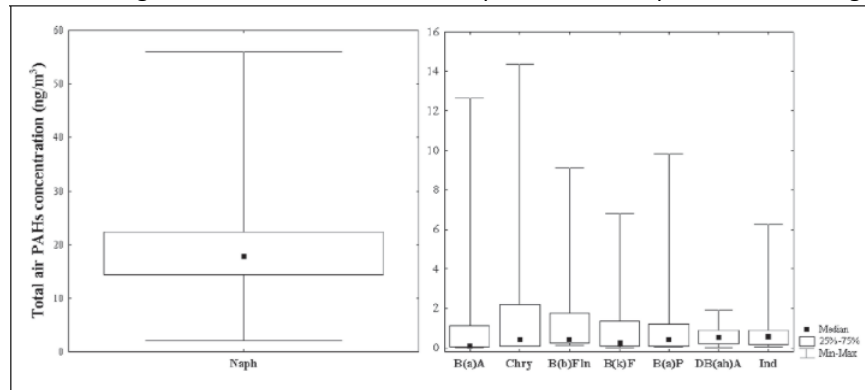


Figura 6, rispettivamente nella prima sono riportati i dati relativi alla concentrazione di PAH legato al particolato e nella seconda figura i PAH distribuiti nell'aria sia in fase gassosa che legati ai PM (Oliveira et al., 2019).

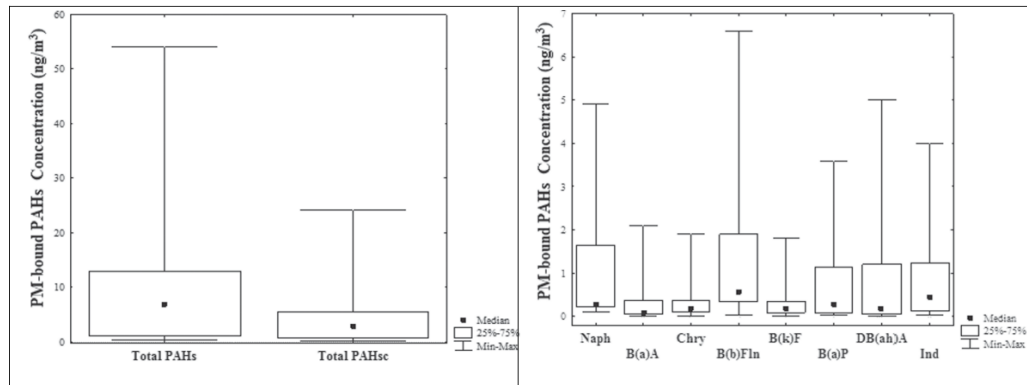
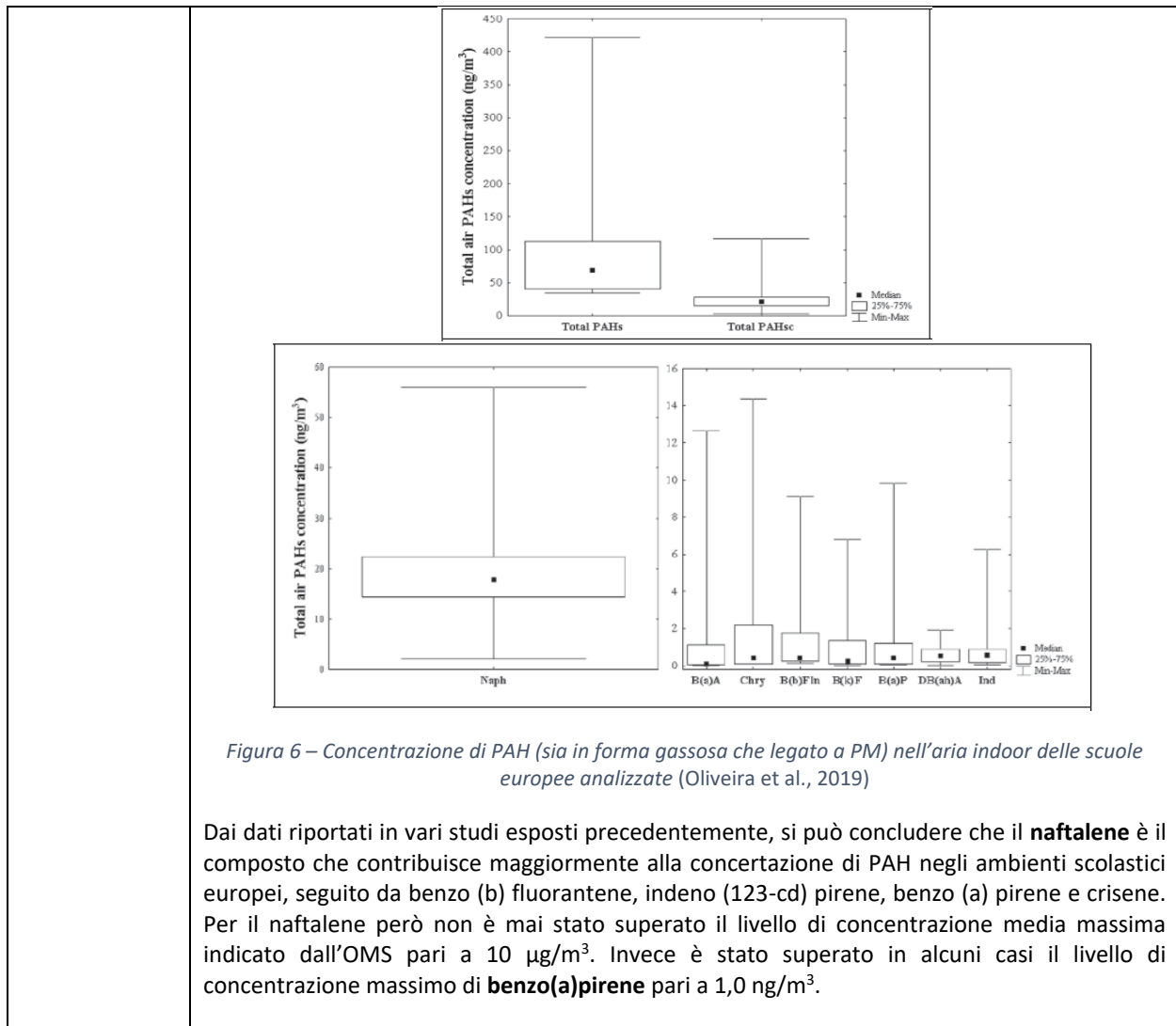
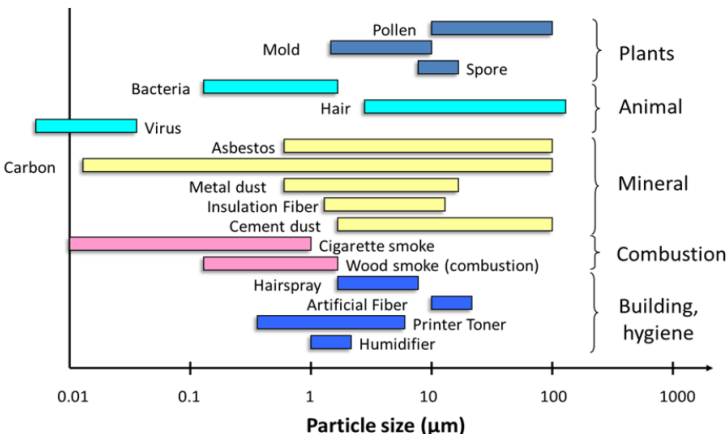


Figura 5 – Concentrazione di PAH legati a PM nell'aria indoor delle scuole europee analizzate (Oliveira et al., 2019)



3.5 Particelle e fibre

3.5.1 PM (Particulate Matter)

<p>Caratteristiche</p>	<p>Le particelle di particolato aerodisperso sono classificate in base al loro diametro:</p> <ul style="list-style-type: none"> - $\leq 10 \mu\text{m}$ – PM_{10}: sono di interesse per la valutazione del rischio per la salute, poiché sono abbastanza piccole da essere inalate. - $\leq 2.5 \mu\text{m}$ – $\text{PM}_{2.5}$ o particelle fini, sono abbastanza piccole da passare attraverso il tratto respiratorio superiore e raggiungere i polmoni, causando complicazioni nel lungo termine. - $\leq 1 \mu\text{m}$ – PM_1 o particelle submicroniche o molto fini, passano attraverso gli alveoli e quindi penetrano in profondità all'interno del corpo. - $\leq 0.1 \mu\text{m}$ – $\text{PM}_{0.1}$ o nanoparticelle o particelle ultrafini, passano attraverso gli alveoli e quindi penetrano in profondità all'interno del corpo. <p>Questi ultimi due tipi di particelle possono diventare veicolo anche per altri contaminanti chimici, fisici e biologici (es. PAH).</p>  <p>Figura 7 - Dimensione delle particelle sospese nell'aria interna in base alla loro origine (Owen et al., 1990)</p>
<p>Fonti</p>	<p>Le principali fonti di PM negli ambienti interni delle scuole sono gli occupanti (scaglie di pelle, fibre di tessuto, possibile condensazione di composti organici volatili), l'arredamento delle aule (lavagne, tavoli, sedie, ecc.) e l'uso di sistemi di condizionamento e riscaldamento dell'aria (Destailats et al., 2008; Morawska et al., 2017). In alcune scuole spagnole è stato riscontrato anche un legame fra concentrazione di PM all'interno delle aule e tipologia di giardino esterno: in presenza di terreno sabbioso, internamente si riscontra una maggiore concentrazione di PM (Amato et al., 2014). Cucina, pulizia e uso di apparecchiature da ufficio (stampanti e macchine fotocopiatrici) costituiscono anche importanti fonti di PM all'interno delle scuole (Salthammer et al., 2016).</p>
<p>Effetti</p>	<p>L'organizzazione mondiale della sanità ha evidenziato che esposizioni ad elevate concentrazioni di PM anche per brevi periodi può causare effetti sul sistema cardiorespiratorio dei bambini (es. broncopneumopatia cronica ostruttiva, bronchite acuta, asma, polmonite).</p> <p>Nei bambini è stata evidenziata una minore pervietà nasale (area delle narici) in bambini esposti in aula a livelli di $\text{PM}_{10} > 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (M. Simoni, I. Annesi-Maesano, T. Sigsgaard, D. Norback, G. Wieslander, W. Nystad, M. Canciani, P. Sestini, 2010).</p>
<p>Standard/Linee guida</p>	<p>PM_{10}: $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h) e $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 anno) $\text{PM}_{2.5}$: $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h) e $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 anno) - OMS 2005 per l'aria esterna</p>

Livelli di esposizione nelle scuole europee

In Figura 8 è riportato quanto emerso da studi e analisi della concentrazione di PM10 e di PM2.5 svolte rispettivamente su 23 e su 41 scuole europee (Oliveira et al., 2019); mentre in Figura 9 è riassunto il livello di concentrazione di PM riscontrato all'esterno delle scuole (PM10: n. 22 scuole, PM 2.5: n. 32 scuole). Nonostante il numero alto di studi, non è stata trovata alcuna tendenza generale perché le concentrazioni variano significativamente tra le varie scuole dei vari Paesi. La divergenza è principalmente attribuita a diversi livelli di sviluppo economico e dissimilarità sociali e culturali, mentre l'eterogeneità intra-continente dipende più dalla posizione geografica delle città (urbanizzazione e pianificazione, ubicazione della scuola, tipo di costruzione e materiali usati, ecc..), clima e condizioni metrologiche stagionali. È stato però riscontrato che le scuole situate nelle vicinanze di complessi industriali e in prossimità di strade con forti emissioni di traffico concentrazioni più elevate di PM (Alvarado-Cruz et al., 2017).

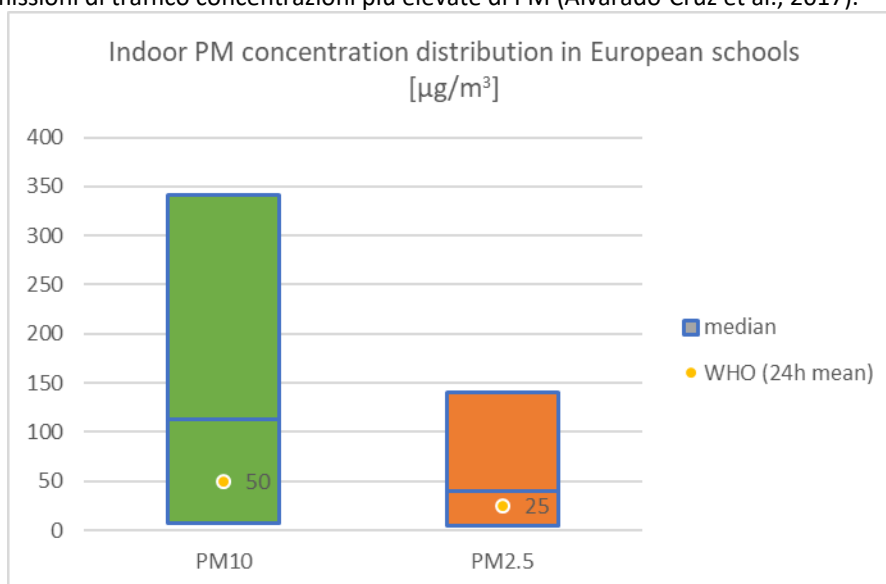


Figura 8 - Distribuzione delle concentrazioni di PM10 e PM2.5 riscontrate nelle scuole europee (Indoor) – Fonte: (Oliveira et al., 2019)

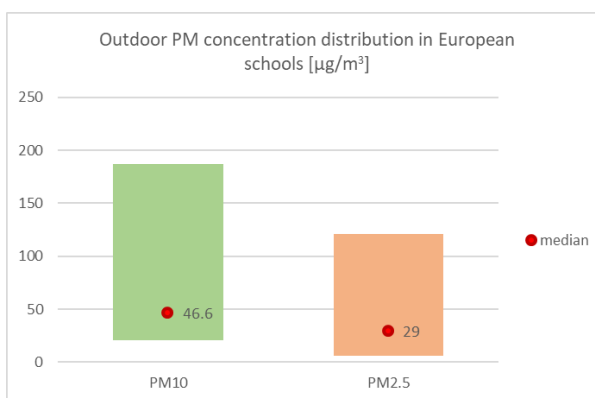


Figura 9 - Distribuzione delle concentrazioni di PM10 e PM2.5 riscontrate all'esterno di alcune scuole europee (Outdoor)

I risultati del progetto SEARCH, focalizzato sulle concentrazioni medie di PM2.5 durante le ore di insegnamento, mostrano che nel 47% delle aule analizzate i valori sono compresi

	<p>fra i 10 e i 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, e che nel 13% degli studenti è esposto a concentrazioni superiori ai 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.</p> <p>Concentrazioni medie di PM10 misurate durante le ore di scuola (in Italia: 24h) variano tra 56 e 102 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La concentrazione media di PM10 rilevata nelle scuole italiane era pari a 98$\mu\text{g}/\text{m}^3$; in più della metà delle aule era presente una concentrazione superiore ai limiti ambientali per esposizioni a breve ed a lungo-termine (se riferita all'outdoor, la soglia è di 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).</p> <p>Nell'ambito del progetto InAirQ, la concentrazione media annua di PM10 monitorata in 44 scuole italiane nel 2008 è risultata pari a 82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.</p> <p>Nelle studio condotto da HESE su 21 scuole europee (Siena and Udine, Italia; Reims, Francia; Oslo, Norvegia; Uppsala, Svezia; and Århus, Danimarca) è stato riscontrato nel 78% delle scuole un livello di $\text{PM}_{10} > 50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, soprattutto in Danimarca e in Italia (M. Simoni, I. Annesi-Maesano, 2010). La concentrazione media di PM10 rilevata nelle scuole italiane era pari a 153$\mu\text{g}/\text{m}^3$.</p>
--	--

3.6 Contaminanti biologici

<i>Caratteristiche</i>	Sono rappresentati da particelle organiche aerodisperse di dimensione dell'ordine dei micrometri, spesso legate ad altre particelle di dimensioni maggiori, costituite da microorganismi (es. acari della polvere), materiali biologici, batteri (es. legionelle), virus, funghi (muffe e lieviti), pollini.
<i>Fonti</i>	<p>Nelle scuole il rischio biologico è di natura prevalentemente infettiva e l'esposizione ad agenti biologici avviene in maniera accidentale per inalazione o per contatto diretto con un altro individuo o indiretto attraverso oggetti contaminati.</p> <p>Le fonti principali sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> - persone, - alimenti e rifiuti, - aria esterna, - presenza di polvere in manufatti tessili - presenza di acqua stagnante o da zone umide all'interno dei materiali da costruzione, - umidificatori o condizionatori d'aria in caso di inadeguata manutenzione e pulizia delle macchine. <p>Cattiva manutenzione e mancanza di pulizia possono creare le condizioni favorevoli per la proliferazione di tali contaminanti.</p> <p>Il sovraffollamento e la scarsa aerazione degli ambienti aumentano le occasioni di esposizione degli studenti per via aerogena ad agenti patogeni provenienti da portatori sani o asintomatici, o anche da portatori di malattie in fase di incubazione.</p>
<i>Effetti</i>	<p>Tubercolosi, morbillo, infezioni da stafilococco, influenza e malattia del legionario sono alcune delle malattie causate dall'esposizione a materiale biologico nell'aria interna. In alcuni soggetti particolarmente sensibili sono possibili manifestazioni allergiche causate da muffe, spore fungine, amebe, alghe, batteri, escrementi e derivati da acari, insetti e parassiti, pollini, endotossine, ecc...</p> <p>Dalle analisi dei dati raccolti durante lo studio HESE risulta che i bambini esposti a livelli di muffe superiori a 300cfu (colony forming unit) per metro cubo d'aria (limite massimo suggerito dall'ASHRAE per una buona IAQ), rispetto a quelli esposti a livelli inferiori, hanno un maggior rischio di riportare tosse secca notturna (OR: 3.10, IC 95% 1.61–5.98), rinite (OR: 2.86, IC 95% 1.65–4.95) e tosse persistente (OR: 3.79, IC 95% 2.40–5.60) (Simoni et al., 2011).</p>
<i>Parametri termoigrometrici</i>	La qualità dell'aria subisce un netto peggioramento al crescere di temperatura e umidità relativa dell'ambiente interno. Un ambiente con valori di umidità relativa superiori al 50-70% favorisce lo sviluppo di agenti patogeni di origine biologica quali microorganismi, batteri come la legionella pneumophila, e ancora acari e sostanze allergene, che si sviluppano e moltiplicano su rivestimenti, suppellettili, superfici di impianti di distribuzione dell'aria nonché all'interno dell'acqua stagnante degli impianti di condizionamento. Gli agenti patogeni infettivi invece si trasmettono più facilmente in ambienti secchi, in quanto, al crescere dell'umidità relativa, tendono ad assumere diametro e peso maggiori, precipitando quindi in minor tempo.
<i>Standard/Linee guida</i>	<p>Non esistono valori di riferimento relativi all'aria indoor.</p> <p>Recentemente l'OMS ha pubblicato le linee guida per la qualità dell'aria indoor relativamente a umidità e muffe [WHO, 2009].</p>
<i>Metodo di indagine</i>	Nella prassi comune, per il controllo microbiologico della IAQ si procede al campionamento di aria e superfici rappresentativi dell'ambiente indoor e alla misura dei livelli di concentrazione batterica e fungina totale (muffe e lieviti) e all'analisi della tipologia dei contaminanti.

	<p>La misura viene effettuata attraverso l'utilizzo di tecniche colturali, che consentono di conteggiare il numero di colonie dei microrganismi vitali e coltivabili in laboratorio, esprimendo i risultati in funzione dell'unità di volume d'aria o di superficie esaminata. I valori di concentrazione microbica misurati sono confrontati con quelli corrispondenti rilevati nell'ambiente esterno (outdoor), per verificare eventuali fenomeni di accumulo o crescita microbica nell'indoor.</p>
<p><i>Indicatori</i></p>	<p>Un indicatore è l'Unità Formanti Colonia (UFC) per m³ di aria = Concentrazione totale di batteri e funghi nell'aria. Il giudizio sulla carica microbica totale si può ritenere "buono" se questa risulta compresa tra 0 e 25 UFC/24 cm² di superficie (corrispondenti a 0 - 104 UFC/100cm²) - American Public Health Association (APHA, 1970).</p> <p>In Italia è stato proposto l'Indice Globale di Contaminazione Microbica (IGCM) per m³ di aria (Dacarro, Grignani, Lodola, Grisoli, & Cottica, 2000): UFC batteri mesofili (37°C) + UFC batteri psicrofili (20°C) + UFC miceti.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Per IGCM/m³<1000 il livello di contaminazione è considerato "Basso". - Per IGCM/m³>5000 si entra nella categoria di contaminazione "Alta". <p>Altro indicatore è l'Indice di Contaminazione da batteri Mesofili (ICM): UFC batteri mesofili (37°C) / UFC batteri psicrofili (20°C). Tale indice valuta il contributo, alla contaminazione totale, dei batteri di origine umana, tra i quali possono essere presenti patogeni. È indicativo del livello di affollamento e dell'efficienza dei ricambi d'aria.</p> <p>Un terzo indicatore: IA (Indice di Amplificazione): IGCM indoor / IGCM outdoor. Tale indice valuta eventuali fenomeni di accumulo interno della contaminazione (stato igienico).</p> <p>Per quanto riguarda la contaminazione delle superfici, non sono disponibili indici di riferimento specifici per le scuole. Per l'American Public Health Association (APHA, 1970) si può ritenere "buono" se la carica microbica risulta compresa tra 0 e 25 UFC/24 cm² di superficie, corrispondenti a 0 - 104 UFC/100cm².</p>
<p><i>Livelli di esposizione</i></p>	<p>Nell'indagine condotta da INAIL, sono stati raccolti stagionalmente nel corso delle normali attività didattiche 534 campioni in 4 edifici scolastici romani con ventilazione naturale.</p> <p>La classe di contaminazione registrata nelle classi è "Bassa" (IGCM/m³<1000). In alcuni laboratori, durante la stagione estiva il livello di contaminazione è risultato "Intermedio", parimenti ai livelli outdoor (1000<IGCM/m³<5000).</p> <p>Durante la stagione estiva è stato registrato anche un livello di ICM>1, quindi un apporto antropico più marcato, e un IA>1 in presenza di sovraffollamento delle aule e dei laboratori e in mancanza di un adeguato ricambio dell'aria.</p> <p>Inoltre è stato rilevato che la concentrazione degli Stafilococchi nell'aria (batteri Gram positivi presenti nella popolazione microbica della cute e delle mucose dell'uomo) è più elevata nelle palestre delle scuole: l'attività motoria svolta comporta sudorazione, desquamazione cutanea e sollevamento di polvere.</p>

3.7 Anidride carbonica (CO₂)

<i>Caratteristiche</i>	Nei locali chiusi, il livello di concentrazione di CO ₂ rappresenta un buon indicatore della qualità dell'aria, poiché il suo livello nell'aria aumenta in modo proporzionale rispetto a tutte le altre sostanze. La concentrazione di CO ₂ , quindi, non viene misurata perché questa sostanza è più dannosa di altre, ma perché permette di quantificare facilmente il carico ambientale dell'aria delle aule e valutare il ricambio di aria.
<i>Fonti</i>	Prodotto di scarto della respirazione cellulare, l'anidride carbonica (CO ₂) è prodotta dall'uomo con la respirazione. In caso di normale attività all'interno di una stanza, una persona adulta produce circa 20 l/h di CO ₂ , mentre i bambini circa 10 l/h. Il contenuto di CO ₂ nell'aria esterna è di circa 0,04% vol. o 400 ppm. Causa di concentrazioni elevate di CO ₂ negli ambienti scolastici sono l'elevato affollamento delle aule, il tempo di permanenza e il tasso di ventilazione (ricambio d'aria).
<i>Effetti</i>	<p>I risultati del progetto SEARCH II (School Environment and Respiratory Health of Children) hanno evidenziato una relazione fra esposizione a livelli di CO₂ superiori a 1000 ppm e tosse secca notturna e rinite nei bambini (M. Simoni, I. Annesi-Maesano, 2010). Questo valore corrisponde tra l'altro allo standard suggerito dall'ASHRAE per esposizioni a lungo termine (Baglioni et al., 2010).</p> <p>Gli studi del chimico Pettenkofer – internazionalmente riconosciuti e considerati come standard - hanno dimostrato che le persone che si trovano in stanze con una concentrazione di CO₂ sotto lo 0,1% (1.000 ppm) si sentono a loro agio, mentre con concentrazioni al di sopra dello 0,2% (2000 ppm) si sentono chiaramente a disagio, con diminuzione dell'attenzione, della capacità produttiva e del benessere generale.</p>
<i>Standard/Linee guida</i>	<p>Alla luce delle conoscenze scientifiche disponibili in merito a qualità dell'aria ambiente, salute e rendimento intellettuale (vedi capitolo 4) e in considerazione delle vigenti norme SIA per la qualità dell'aria ambiente, l'UFSP in Svizzera raccomanda quanto segue:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Superamenti del livello di CO₂ oltre i 2000 ppm devono essere assolutamente evitati. In caso di superamenti frequenti, vanno adottate misure tempestive per migliorare la ventilazione. 2. Per un'aria ambiente salubre e buone condizioni di apprendimento, il livello di CO₂ nelle aule scolastiche non deve mai superare i 1400 ppm. Per ogni nuova costruzione o risanamento di edifici scolastici deve essere attuato un piano di ventilazione che permetta di raggiungere questo obiettivo. <p>Le linee guida CasaClima School dell'Agenzia Casa Clima indica, in caso di ventilazione naturale, di non superare la soglia di 1500 ppm all'interno delle aule scolastiche e consiglia di mantenere il livello inferiore ai 1000 ppm. La ventilazione meccanica controllata deve essere dimensionata in modo da garantire i ricambi d'aria minimi previsti per legge e deve garantire una concentrazione di CO₂ inferiore ai 1000 ppm (IDA 2).</p> <p>La Commissione interna per l'igiene dell'aria dell'Agenzia federale dell'ambiente tedesca indica che un livello di concentrazione di CO₂ inferiore ai 1000 ppm corrisponde ad un'ottima qualità dell'aria indoor, un livello compreso fra 1000 e 2000 ppm è ancora un livello accettabile, mentre superata la soglia dei 2000 ppm l'ambiente diventa insalubre⁶.</p>
<i>Livelli di esposizione</i>	Nelle studio condotto da HESE su 21 scuole europee (Siena and Udine, Italia; Reims, Francia; Oslo, Norvegia; Uppsala, Svezia; and Århus, Danimarca) è stato riscontrato nel 66% delle scuole un livello di CO₂ > 1000 ppm (M. Simoni, I. Annesi-Maesano, 2010). Tali concentrazioni non risultavano essere influenzate da fattori ambientali esterni,

⁶ http://www.komfortlueftung.at/fileadmin/komfortlueftung/Klassenzimmer/PM_TH_01_15_internetx.pdf

confermando l'origine indoor degli inquinanti misurati nelle aule. La qualità dell'aria è risultata accettabile nelle scuole in cui veniva garantito un adeguato numero di ricambi d'aria.

Nella campagna "**Aria fresca, idee chiare**"⁷, basata sullo studio «Gute Luft in Schweizer Schulen», l'Ufficio federale della sanità pubblica (UFSP), in collaborazione con alcuni Comuni dei Cantoni di Berna, dei Grigioni e di Vaud, durante le stagioni di riscaldamento 2013/14 e 2014/15 ha misurato la concentrazione di CO₂ in 100 aule di 96 edifici scolastici e ampliamenti per quattro giorni di seguito. Nel 90% degli edifici, la ventilazione era affidata all'apertura manuale delle finestre. Dallo studio è emerso che in più di 2/3 delle aule con ventilazione naturale la qualità dell'aria non era soddisfacente, cioè **per più del 10% del tempo di lezione CO₂ > 2000 ppm**.

Il monitoraggio della concentrazione di anidride carbonica in 115 classi delle scuole in lingua tedesca effettuato tra febbraio e aprile 2018, con l'iniziativa "**Aria viziata in classe**" da parte del Laboratorio di chimica fisica dell'Agenzia provinciale per l'ambiente, ha permesso di evidenziare che in quasi tutte le classi il valore limite di CO₂ (1400 ppm) viene raggiunto e superato in meno di mezz'ora di lezione.

La campagna di misura condotta da INAIL a Roma in 4 edifici con ventilazione naturale, ha rilevato livelli di CO₂ superiori a 3500ppm specialmente nella stagione invernale. Non sono state osservate correlazioni dei dati raccolti né con la tipologia di ambiente (aula, laboratorio, palestra, ufficio) né con l'indice di affollamento.

I risultati dell'analisi di 12 scuole dell'infanzia ubicate sul territorio ticinese (Canonica, 2014), sei delle quali con standard Minergie e sei costruite in maniera tradizionale, indicano che il livello di CO₂ è inferiore al valore limite raccomandato: solamente in due scuole tradizionali il limite di 1000 ppm è stato superato.

⁷ <https://www.schulen-lueften.ch/it>

4 Progetti europei

Nel 2010, la Dichiarazione di Parma dell'OMS Europa, approvata da 53 paesi, ha invitato gli Stati membri della regione OMS Europa ad attuare azioni misurabili al fine di raggiungere gli obiettivi fissati. Dagli obiettivi di questa dichiarazione sono nati alcuni progetti pilota a livello europeo con il fine di monitorare l'ambiente scolastico e la salute dei bambini.

In questo capitolo vengono descritti i principali progetti europei e le principali iniziative nazionali con oggetto l'analisi della qualità dell'aria interna negli ambienti scolastici. In Tabella 3 sono riportati per ogni progetto, il tipo di finanziamento, i Paesi coinvolti, obiettivi del progetto e parametri monitorati.

4.1 Studio HESE (Health Effect of School Environment)

Finanziamento e Paesi coinvolti

Studio promosso e finanziato dalla DG-SANCO della Commissione Europea e coordinato dall'Università di Siena.
Anno: 2004-2005

Ha coinvolto 5 Paesi e un campione di 21 scuole (46 aule) elementari:

- Francia (Reims - 4 scuole),
- Svezia (Uppsala - 4),
- Norvegia (Oslo - 3),
- Danimarca (Arhus - 2),
- Italia (Siena - 4, Udine - 4).

Obiettivi e metodo di lavoro

Il progetto ha sviluppato strumenti per la valutazione e l'analisi della qualità dell'aria nelle scuole europee, attraverso la definizione di questionari, test clinici, procedure per l'ispezione degli edifici e monitoraggi ambientali.

All'interno del report finale dello studio (HESE, 2006), sono riportati in dettaglio questionari, test clinici e metodologie di monitoraggio ambientale utilizzati durante le analisi delle 21 scuole campione:

1) Sono stati somministrati **questionari**, validati da ISAAC - International Study of Asthma and Allergies in Childhood, a (nel documento (HESE, 2006) i questionari sono riportati per intero):

- *studenti*: percezione IAQ, sintomi legati alla scuola, esposizione a fumo di tabacco;
- *insegnanti*: ambiente scolastico e aula, politiche della scuola sulla IAQ e bambini con problemi di asma;
- *genitori*: storia medica dell'alunno e della famiglia, ambiente domestico, cibo e stile di vita.

2) I bambini sono stati sottoposti ai seguenti **test clinici**:

- a. Prove cutanee per test allergeni
- b. Spirometria
- c. Rinometria acustica prima e dopo la somministrazione di un vasocostrittore locale.
- d. Raccolta di lavanda nasale per la misurazione del pH e dell'interleuchina 1
- e. Raccolta del condensato di respiro per la misurazione dell'interleuchina 8
- f. Numero di battito dell'occhio al minuto
- g. Analisi della lacrimazione

3) Sono state eseguite **indagini ambientali**:

- Ispezione dell'edificio: Raccolta dati sulle caratteristiche dell'edificio/impianto e delle aule scolastiche;

- Monitoraggi ambientali indoor e outdoor:
 - Temperatura
 - Umidità relativa
 - CO2
 - PM10, Particelle ultrafini, O3, NO2, Formaldeide (effettuati solitamente con campionamenti diffusivi della durata di 1 settimana in 2 differenti stagioni)
 - Allergeni + VOCM (Microbial Volatile Organic Compounds): muffe e batteri

Risultati

Il report finale di progetto (HESE, 2006) riporta i risultati di misure outdoor/indoor, test clinici e questionari somministrati a insegnanti e studenti.

Sono state trovate poche fonti di inquinanti nelle scuole, ma è stata rilevata molta presenza di polvere, di umidità e di muffa (rilevata anche dai questionari degli insegnanti). Sono stati riscontrati bassi livelli di formaldeide (aule con arredi vecchi). Sono stati riscontrati livelli di CO2 superiori ai 1000ppm nel 67% delle aule, specie per mancanza di adeguata ventilazione. Nelle aule con ventilazione meccanica è stato riscontrato una migliore IAQ: livelli di CO2, PM10, umidità e allergeni più basso. Sono state rilevate alte concentrazioni di PM10, particelle ultrafini e NOx all'esterno e all'interno delle scuole site vicino a strade trafficate.

È stata evidenziata una minore pervietà nasale (area delle narici) in bambini esposti a livelli di PM10 >50µg/m³ in aula. Il 30% dei bambini inoltre presentava problemi di asma. In sole due scuole è stata applicata una politica per la gestione della qualità dell'aria e in una sola scuola era stato formato personale per la gestione di attacchi di asma.

4.2 Progetti SEARCH I, II e III

Finanziamento e Paesi coinvolti

Progetto promosso dal Regional Environmental Center for Central and Eastern Europe (REC), sviluppato in 3 fasi fra il 2010 e il 2016.

SEARCH I: Ha coinvolto 6 Paesi europei: Ungheria, Italia, Albania, Bosnia e Erzegovina, Serbia, e Slovacchia. 60 scuole; 243 classi; 5.000 ragazzi

SEARCH II: Hanno partecipato i Paesi del SEARCH-I e alcuni Paesi dell'Asia centrale (Kazakistan, Tagikistan, Ucraina e Bielorussia). 101 scuole coinvolte e 6.758 bambini.

SEARCH III: 10 Paesi hanno preso parte al lavoro; quattro dall'Europa dell'Est, dal Caucaso e dall'Asia Centrale e sei dall'Europa

Obiettivi e metodo di lavoro

Obiettivo del primo progetto era la creazione, attraverso valutazioni effettuate in alcuni Paesi selezionati, di un database ambiente e salute omnicomprensivo. Con la fase II del Progetto SEARCH si è voluto indagare più a fondo anche su altri fattori di rischio, quali ad esempio l'uso e il fabbisogno energetico che, insieme alle caratteristiche di costruzione degli edifici scolastici, influiscono su variabili importanti per il benessere degli individui come temperatura e umidità.

Metodo di lavoro:

- Indagini ambientali ed energetiche: Raccolta dati sulle caratteristiche di edificio/impianto e delle aule scolastiche, dei dati energetici
- Monitoraggio Ambientale indoor e outdoor con metodo diffusivo (NO₂, Formaldeide, Benzene, Toluene, Xileni-BTEX) e attivo (CO₂, PM10)

- Indagini sul comfort: questionari
- Indagini sanitarie: questionario compilato dai genitori, misura della funzionalità respiratoria del bambino (esami spirometrici effettuata direttamente nelle scuole da tecnici specializzati)

La terza parte del progetto ha visto lo sviluppo un toolkit online "Air Pack" contenete materiali didattici progettati per insegnanti e studenti per incrementare la visibilità e la divulgazione pratica dei risultati e delle raccomandazioni sulla qualità dell'aria interna del SEARCH I e II.

Risultati

Nel documento del progetto SEARCH II (Timea Beregszaszi et al., 2013), sono riportati i risultati delle campagne di monitoraggio e la valutazione sia del comfort dei bambini che la loro esposizione all'inquinamento dell'aria interna nelle scuole.

I bambini sono esposti a concentrazioni di benzene spesso superiori ai 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Inoltre nelle scuole più vicine a strade trafficate sono state rilevate maggiori concentrazioni di PM. L'affollamento delle aule monitorate era pari a 2.02 $\text{m}^3/\text{bambino}$ ed è stato rilevato che il sovraffollamento è direttamente correlato alla concentrazione di PM10 e CO2.

Pollutant	Albania	Belarus	Bosnia and Herzegovina	Hungary	Italy	Kazakhstan	Serbia	Slovakia	Tajikistan	Ukraine
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	69	28	102	56	82	65	81	80	91	33
Formaldehyde ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5.6	7.5	7.1	2.4	33.1	10.4	1.7	8.7	12.9	11.5
Benzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	4.1	2.0	6.3	2.2	2.0	6.3	5.9	4.8	7.4	2.5
Toluene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	15.5	6.2	27.6	4.6	5.0	18.1	21.9	29.5	17.4	4.9
Ethylbenzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.2	0.9	1.6	1.6	1.8	1.6	1.6	1.4	1.5	0.8
Xylenes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5.0	5.9	7.7	7.0	7.1	9.1	8.0	5.1	7.0	4.3
NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	12	10	21	16	19	17	22	14	13	12

Figura 10 – Risultati dei monitoraggi ambientali del progetto SEARCH (Csobod et al., 2010).

Il tavolo di lavoro italiano ha pubblicato il documento "Qualità dell'aria nelle scuole: un dovere di tutti, un diritto dei bambini", con una sintesi dei dati delle indagini ambientali nelle scuole italiane e tutte le informazioni utili per una prevenzione attiva e consapevole. I risultati principali del progetto, presentati da ISPRA in un convegno nazionale, hanno registrato nelle aule italiane per gli stessi inquinanti concentrazioni indoor più alte rispetto a quelle esterne, a conferma del contributo "proprio" di fonti interne nel rilascio di sostanze chimiche. In particolare, la concentrazione di PM10 all'interno delle scuole risulta superiore alla concentrazione in aria esterna (media 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Inoltre, i valori di formaldeide riscontrati nelle scuole italiane sono risultati quelli più elevati tra tutte le scuole europee indagate (media 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

4.3 Progetto SINPHONIE

Finanziamento e Paesi coinvolti

Il progetto SINPHONIE - Schools Indoor Pollution and Health: Observatory Network in Europe, è stato finanziato dalla Commissione Europea, attraverso la DG SANCO (Direzione Generale della Commissione Europea per la Salute ed il Consumatore) e rientra nel piano d'azione europeo su Ambiente e Salute 2004-2012. Anno: 2010-2012.

Ha coinvolto 25 Paesi europei - 120 scuole - 3 classi per scuola. L'Italia ha partecipato con 3 Regioni (Lombardia, Toscana, Sicilia).

Obiettivi e metodo di lavoro

Focus sulle scuole e le strutture per l'infanzia, con lo scopo di definire raccomandazioni per le politiche delle misure di recupero dell'ambiente scolastico. Gli obiettivi primari dello studio sono: 1) revisione critica sugli effetti più rilevanti dell'esposizione ad inquinamento nell'ambiente scolastico, 2) valutazione della qualità dell'aria nelle classi delle scuole selezionate e degli effetti sulla salute degli alunni attraverso:

- Raccolta dati sulla salute dei bambini e degli insegnanti per mezzo di questionari;
- misurazioni oggettive di inquinanti all'interno e all'esterno delle scuole;
- esami clinici e strumentali su campioni di scolari.

Risultati

Il documento "Linee guida per un ambiente scolastico sano in Europa" (Kephalopoulos, Csobod, Bruinen de Bruin, et al., 2014) include i fattori chiave e le strategie di prevenzione, controllo, bonifica e comunicazione per un ambiente scolastico sano in Europa.

4.4 Progetto EnVIE

Il progetto EnVIE ("Health, exposure and source issues"), finanziato da 6° programma Quadro dell'Unione Europea (2008), non ha per oggetto l'analisi della IAQ nelle scuole, ma è interessante perché ha sviluppato uno strumento per valutare la relazione quantitativa tra malattie correlate all'IAQ (allergie, sintomi di asma, polmonare, broncopneumopatia cronica ostruttiva, infezioni respiratorie trasportate dall'aria, morbilità cardiovascolare e mortalità, sindrome dell'edificio malato), fonti di esposizione interna rilevanti e l'impatto delle misure politiche.

Il progetto EnVIE ha identificato due strategie per il controllo della IAQ:

- controllo delle fonti (eliminando o mitigando le fonti),
- controllo dell'esposizione (ventilazione).

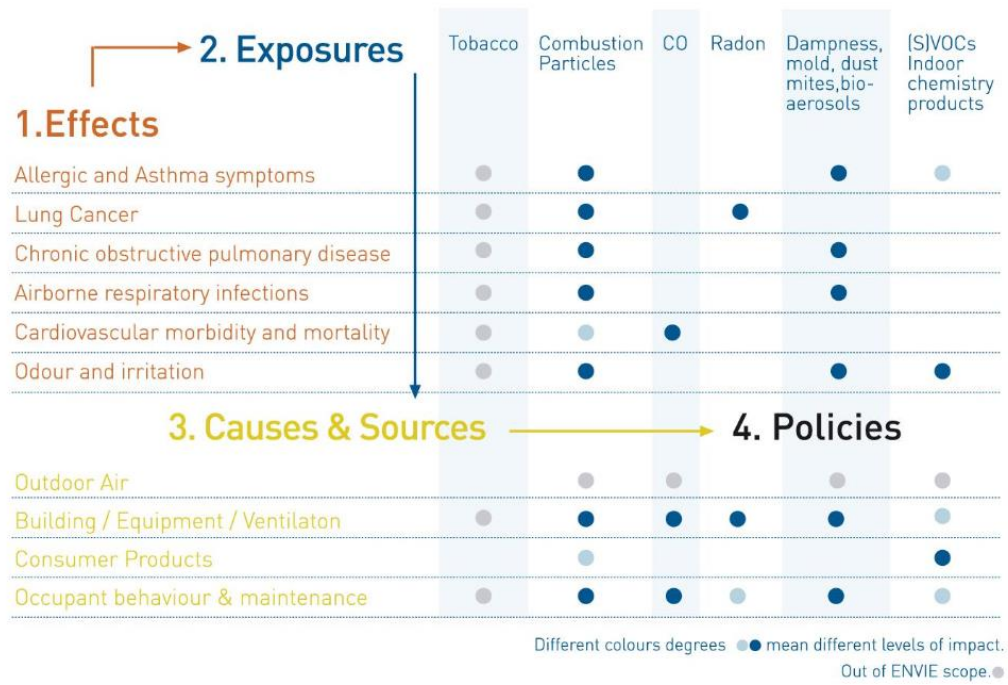


Figura 11 – Diagramma di flusso del progetto EnVIE che evidenzia la correlazione tra i problemi di salute, esposizione e fonte.

Progetto	Finanziamento	Scuole e Paesi coinvolti	Obiettivo del progetto	Parametri monitorati	Risultati
Studio HESE (Health Effect of School Environment)	Promosso e finanziato dalla DG-SANCO della Commissione Europea Anno: 2004-2005 Coordinato da Università di Siena	Ha coinvolto 5 Paesi e un campione di 21 scuole (46 aule) elementari: Francia (Reims - 4 scuole), Svezia (Uppsala - 4), Norvegia (Oslo - 3), Danimarca (Arhus - 2) e Italia (Siena - 4, Udine - 4)	Sviluppo di strumenti per la valutazione della qualità dell'aria nelle scuole e analisi dello stato della IAQ nelle scuole europee	Inquinanti indoor/outdoor: CO2, PM10, Particelle ultrafini, Ozono (O3), NO2, Formaldeide, Allergeni in polvere, Allergeni nell'aria, VOCM (Microbial Volatile Organic Compounds) per muffe e batteri, Culture di muffe e batteri comuni Parametri ambientali: T, U Comfort Salute dei bambini	Report finale di progetto
SINPHONIE - Schools Indoor Pollution and Health: Observatory Network in Europe	Commissione Europea, attraverso la DG SANCO Il progetto rientra nel piano d'azione europeo su Ambiente e Salute 2004-2012. Anno: 2010-2012	25 Paesi europei - 120 scuole - 3 classi per scuola L'Italia partecipa con 3 Regioni (Lombardia, Toscana, Sicilia).	Focus sulle scuole e le strutture per l'infanzia. 1) revisione critica sugli effetti più rilevanti dell'esposizione ad inquinamento nell'ambiente scolastico, 2) valutazione della qualità dell'aria nelle classi delle scuole selezionate e degli effetti sulla salute degli alunni	Inquinanti indoor/outdoor: formaldeide, benzene, tricloroetilene, tetracloroetilene, pinene, limonene, NO2, O3, IPA, radon, CO, CO2, agenti biologici come batteri, muffe e allergeni Parametri ambientali: umidità relativa, T, tasso di ventilazione Comfort Salute dei bambini	"Linee guida per un ambiente scolastico sano in Europa"
SEARCH I (School Environment And Respiratory Health of Children)	Promosso e finanziato dal REC (Regional Environmental Centre for Central and Eastern Europe), Anno: 2006-2009	Ha coinvolto 6 Paesi europei: Ungheria, Italia, Albania, Bosnia e Erzegovina, Serbia, e Slovacchia. 60 scuole; 243 classi; 5.000 ragazzi	Creazione, attraverso valutazioni effettuate in alcuni Paesi selezionati, di un database ambiente e salute omnicomprensivo	Inquinanti indoor/outdoor: PM10, formaldehyde, BTEX, NO2, CO2 Parametri ambientali: umidità relativa, T Comfort Salute dei bambini	"Qualità dell'aria nelle scuole: un dovere di tutti, un diritto dei bambini"

SEARCH II	<p>Coordinato dal REC Anno: 2010-2013</p>	<p>Hanno partecipato i Paesi del SEARCH-I e alcuni Paesi dell'Asia centrale (Kazakistan, Tagikistan, Ucraina e Bielorussia). 101 scuole scoinvolte e 6.758 bambini.</p>	<p>Ha lo scopo di proseguire e completare lo studio e l'analisi dei rischi indoor nelle scuole, indagando anche su uso e fabbisogno energetico e caratteristiche degli edifici scolastici.</p>	<p>Inquinanti indoor/outdoor Parametri ambientali: temperatura, umidità relativa, tasso ventilazione Consumi energetici Comfort</p>	<p>"Making Schools Healthy: Meeting Environment and Health Challenges"</p>
SEARCH III AIR PACK	<p>Realizzato con il supporto del Ministero dell'Ambiente, della Tutela del Territorio e del Mare Anno: 2015-2016</p>	<p>10 Paesi hanno preso parte al lavoro; quattro dall'Europa dell'Est, dal Caucaso e dall'Asia Centrale e sei dall'Europa</p>	<p>Incrementare la visibilità e la divulgazione pratica dei risultati e delle raccomandazioni sulla qualità dell'aria interna del SEARCH I e II.</p>		<p>Sviluppo un toolkit online "Air Pack" contenete materiali didattici progettati per gli insegnanti e bambini (8-11 anni)</p>
InAirQ	<p>Interreg Central Europe Program</p>	<p>1 scuola, 6 istituzioni pubbliche, 5 Paesi: Italia, Slovenia, Repubblica Ceca, Polonia e Ungheria.</p>	<p>Il progetto InAirQ mira a valutare gli impatti della qualità dell'aria indoor sulla popolazione vulnerabile dei bambini in età scolare e ad adottare misure per migliorare la salute dell'ambiente scolastico negli Stati dell'Europa Centrale.</p>	<p>PM, CO2, O3, VOC, Aldeide, Nox, CO, Radon T, umidità</p>	<p>"Virtual Health Repository"</p>

WHO school survey	Coordinato da: WHO Regional Office for Europe Anno: 2011– 2013	Paesi volontari: Albania, Estonia, Croazia, Lettonia, Lituania	Sviluppare e testare una metodologia (protocolli, questionari, training e supporto tecnico) per facilitare l'analisi della IAQ nelle scuole dei Paesi volontari	Formaldehyde, benzene, NO ₂ , CO ₂ , tasso ventilazione, CO, T, umidità Salute degli alunni. Metodo simile a quello usato per SINPHONIE	
AIRMEX - European Indoor Air Monitoring and Exposure Assessment Project	JRC IHCP Anno: 2003-2008	11 città europee. 1000 campionamenti: 182 fra uffici, aule scolastiche e sale di attesa di edifici pubblici; 103 abitazioni privati e 148 campionamenti da cittadini volontari	Scopo: identificare e quantificare i principali contaminanti dell'aria presenti negli edifici pubblici, incluse le scuole	Inquinanti indoor / outdoor: VOC e Aldeidi	

Tabella 3 - Principali iniziative europee di monitoraggio della IAQ nelle scuole e della salute dei bambini

Progetto	Finanziamento	Scuole e Paesi coinvolti	Obiettivo del progetto	Parametri monitorati
SEARCH Italia	Coordinato dal MATTM e da ISPRA	Lombardia, Piemonte, Emilia- Romagna, Lazio, Sicilia e Sardegna. 13 scuole medie (55 classi, 939 alunni)	Come SEARCH II	Come SEARCH II

Progetto “Sicurezza e benessere nelle scuole” - INAIL	Ministero della Pubblica Istruzione (MPI) e INAIL, 2007	Italia: campione di circa 100 scuole di Roma e Provincia	Promuovere “...sicurezza e salute nei luoghi di lavoro, rivolte agli studenti delle Scuole Secondarie Superiori”	agenti biologici, agenti chimici, microclima, rumore, ergonomia degli arredi, radon
Progetto CCM “Indoor School”	Ministero della Salute - Centro Nazionale per la Prevenzione ed il Controllo delle Malattie (CCM), Anno: 2010-2013	Lombardia, Friuli, Toscana, Lazio, Puglia, Sardegna, Sicilia 5.000 ragazzi tra gli 11 e i 12 anni	implementare le linee guida sul controllo dei rischi dell’esposizione a una cattiva IAQ per malattie respiratorie e allergiche nelle scuole primarie e medie	PM10, NOX, aldeidi, formaldeide e BTEX Salute dei bambini: analisi spirometriche
Indoor and outdoor Air quality and Respiratory Health in Malta and Sicily – RESPIRA	Programma di Cooperazione Transfrontaliera (P.O. 2007-2013) Italia-Malta	1200 ragazzi della provincia di Caltanissetta (Sicilia) e 600 a Malta	Valutazione della correlazione fra le patologie respiratorie allergiche dei bambini e gli inquinanti chimici e biologici	inquinanti chimici (gassosi e PM2.5) e biologici (allergeni ed endotossine batteriche) Salute dei bambini
Progetto Indoor “Studio sul comfort e sugli inquinanti fisici e chimici nelle scuole”	Promosso dalla Regione Toscana, anni 2004-2006	61 scuole elementari e medie dislocate sul territorio regionale.	valutazioni ispettive, rilevazioni dell’inquinamento indoor	IAQ e comfort

Tabella 4 – Principali progetti sulla IAQ nelle scuole a livello italiano

5 Protocolli di monitoraggio della IAQ nelle scuole

Non esistono protocolli standard per il monitoraggio della IAQ nelle scuole.

Il documento redatto dal Gruppo Lavoro GARD-I (Baglioni et al., 2010) suggerisce che un'analisi della situazione dell'igiene edilizia ed ambientale nelle strutture scolastiche dell'infanzia e dell'obbligo con riferimento alla IAQ dovrebbe comprendere:

- informazioni sull'area di insediamento dell'edificio scolastico, sulle caratteristiche architettoniche, edilizie ed impiantistiche;
- informazioni sulle concentrazioni nell'aria outdoor ed indoor e sulle potenziali fonti interne di emissione degli inquinanti;
- informazioni per la valutazione dell'interrelazione tra questi gruppi di fattori.

Dall'analisi di letteratura dei principali studi/progetti con oggetto la IAQ nelle scuole, emerge che i principali metodi di analisi sono:

- Monitoraggi ambientali (inquinanti indoor/outdoor e comfort)
- Ispezioni di edifici/impianti
- Questionari
- Test clinici

DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	MISURE/MONITORAGGIO
"Methods for monitoring indoor air quality in schools", JRC	Metodi e strumenti per misurare: Formaldeide, NO ₂ , Benzene, CO ₂ e ricambi d'aria.
"Linee Guida INAIL-CONTARP" (Edizione 2010)	Metodi e strumenti per misurare: Agenti microbiologici - in aria e sulle superfici
"Health Effects of School Environment (HESE) - Final Scientific Report" Siena, January 2006	Strumenti e metodi di misura della concentrazione degli inquinanti, test clinici e questionari effettuati
"Protocol for detailed investigation and intervention study", Progetto InAirQ, 2017	Strumenti e metodi di misura della concentrazione degli inquinanti
«Détermination de la qualité de l'air et du confort thermique à l'intérieur des écoles enfantines construites avec standard Minergie», SUPSI	Strumenti e metodi di misura della concentrazione di CO ₂ , Formaldeide, VOC
"Protocol for Radon measurements in schools and kindergartens", Norwegian Radiation Protection Authority (NRPA) 2015	Protocollo per la misura del Radon nelle scuole

Tabella 5 - Documenti di riferimento dei metodi di indagine della IAQ nelle scuole

5.1 Monitoraggio ambientale

Scelta delle aule campione

I monitoraggi ambientali vengono solitamente eseguiti nelle aule più rappresentative: ad esempio un'aula tranquilla e una di movimento. Nel documento "Methods for monitoring indoor air quality in schools" (World Health Organization - JRC, 2011) si suggerisce di scegliere 1 aula rappresentativa per piano o in alternativa 1 aula al primo piano e 1 all'ultimo piano.

Monitoraggio degli inquinanti

I metodi di campionamento di alcuni inquinanti (ec. Formaldeide, VOC, NO₂) possono essere attivi o passivi.

- **Campionamento passivo:** solitamente si lasciano nelle aule per 1 settimana (5 giorni di scuola e il fine settimana) campionatori di diffusione. Campionamenti per 7gg/settimana e 24h/gg comportano una sovrastima dell'esposizione a un inquinante: questo metodo permette di valutare solo l'entità di un problema e non permette di valutare direttamente la conformità con le linee guida IAQ dell'OMS. Per ovviare a questo problema si potrebbe mettere un cappuccio su ogni campionario alla fine delle lezioni e toglierlo all'inizio della giornata successiva (tale mansione potrebbe essere svolta direttamente dal personale tecnico scolastico e/o dagli insegnanti stessi).
- **Campionamento attivo:** permette il monitoraggio degli inquinanti e l'analisi delle conformità delle loro concentrazioni con le linee guida dell'OMS. Questo tipo di indagine richiede campionamenti attivi con un tempo medio di 30 minuti o inferiore. Dal momento che un singolo campione di 30 minuti non sarebbe rappresentativo, dovrebbe essere utilizzato un numero elevato di misuratori in ciascun luogo per caratterizzare la distribuzione delle concentrazioni e ciò renderebbe il costo del sondaggio proibitivo.

È opportuno predisporre almeno 3 campionatori interni (1 per classe) e 1 misuratore esterno (non serve per formaldeide) (World Health Organization - JRC, 2011). I campionatori interni dovrebbero essere posizionati ad almeno 1m dalle pareti e ad una altezza di almeno 1.5m dal pavimento e allo stesso tempo non devono poter essere manomessi dai bambini.

Occorre considerare l'effetto della stagionalità (per la formaldeide soprattutto) ed effettuare almeno 2 campionamenti in 1 anno (World Health Organization - JRC, 2011).

Nei progetti SEARCH, SINPHONIE, HESE e altri è stato utilizzato principalmente il metodo diffusivo con tempo di campionamento di 5-7 giorni; per il monitoraggio di PM, CO e CO₂ è stato utilizzato il campionamento attivo. Le misure sono state ripetute in 2 stagioni distinte.

Strumenti e procedure

In Tabella 6 sono riportati strumenti e procedure di indagine ambientale suggerite e utilizzate all'interno di progetti e iniziative nazionali/europee.

Inquinante	Documento di riferimento	Modalità di misurazione
Agenti microbiologici - in aria	Linee Guida INAIL-CONTARP (Edizione 2010)	<ul style="list-style-type: none"> - Campionamenti in triplo per ogni parametro misurato per ciascun punto di prelievo; - Utilizzo di campionatore attivo ad impatto ortogonale: SAS Super 180 (International pbi), con portata pari a 180 L aria/min.; - Volumi d'aria campionati: 100 - 200 L; - Terreni di coltura: Tryptic Soy Agar, per le cariche batteriche totali; Sabouraud Agar + cloramfenicolo, per la carica fungina totale; MacConckey Agar per la ricerca dei Gram negativi; Baird Parker Agar + RPF per la ricerca dello Staphylococcus aureus
Agenti microbiologici - sulle superfici	Linee Guida INAIL-CONTARP (Edizione 2010)	I prelievi da superficie sono stati effettuati con piastre a contatto sterili tipo Surfair Plate, posizionate tramite Applicatore RODAC Weight (International pbi) per una durata di contatto con la superficie pari a 10 sec.
Allergeni	(HESE, 2006)	<p>Sono stati raccolti due campioni di polvere per classe (sul lato del corridoio e l'altro sul lato della finestra), con un aspirapolvere con effetto elettrico da 1200 W (Siemens Super XS) dotato di uno speciale collettore di polveri (ALK Abello, Danimarca) dotato di un filtro "Millipore" (dimensione dei pori 6 µm). Il filtro è realizzato in acetato di cellulosa e, secondo il produttore, mantiene il 74% delle particelle 0,3-0,5 µm, l'81% delle particelle 0,5-1,0 µm, il 95% delle particelle 1-10 µm e circa il 100% delle particelle più grandi (> 10 µm). La pulizia sotto vuoto è stata eseguita per un totale di 4 minuti per campione, 2 minuti sul pavimento e 2 minuti su altre superfici (scrivanie, sedie) (Smedje et al., 1997).</p> <p>La polvere dispersa nell'aria è stata raccolta su due piastre di Petri (superficie di 0,0124 m²) posizionate lasciate per 6-8 giorni su superfici orizzontali a 1-1.5m di altezza in ciascuna classe.</p>
Benzene	(World Health Organization - JRC, 2011)	Concentrazioni medie settimanali - Campionatori di diffusione
CO2	(World Health Organization - JRC, 2011)	<ol style="list-style-type: none"> 1- Dispositivo di monitoraggio portatile della CO2 in continuo (con monitor). L'interpretazione dei dati richiede la contemporanea analisi dati di occupazione dell'aula (numero, età e genere, e livelli di attività fisica degli occupanti), dati relativi all'impianto HVAC e dati meteorologici durante le misurazioni. La misura va condotta in più classi contemporaneamente. 2- Un secondo approccio può essere l'uso di gas traccianti SF6 (ma di difficile utilizzo all'interno delle classi) <p>Posizionare 1 sensore di CO2 anche all'esterno per misurare livello outdoor</p>
CO2	(Canonica, 2014)	<p>Strumento utilizzato: Bappu-evo, strumento multifunzione della società Elk GmbH Ingenieurbüro für Elektronik, a Krefeld.</p> <p>Misure durante 7 giorni consecutivi (5 giorni di scuola e il fine settimana) con frequenza di campionamento ogni 5 minuti.</p>

Formaldeide	(World Health Organization - JRC, 2011)	Concentrazioni medie settimanali - Campionatori di diffusione passivi: utilizzate per caratterizzare l'entità del problema. (1 per aula)
Formaldeide	(HESE, 2006)	La formaldeide è stata campionata da campionatori di diffusione impregnati con 2,4-dinitro-fenilidrazina (Levin et al. 1988).
Formaldeide	(Canonica, 2014)	o Prelievi attivi: della durata di 1h - campionatori utilizzati: Gilian, modello Gilair Plus e SKC, modello Aircheck Xr 5000 (cartucce DNPH). Una campagna durante le vacanze scolastiche con finestre chiuse. La seconda campagna: i campioni sono stati prelevati al mattino, prima dell'arrivo dei bambini, con l'aula chiusa dal pomeriggio del giorno precedente, o durante la pausa pranzo, dopo quattro ore di presenza. Frequenza di campionamento: 1l/min per 90minuti o Prelievi passivi: della durata di 1 settimana - campionatori diffusivi Radiello e SKC UMEX 100, posizionati all'altezza di 2m al centro delle aule e 1 campionatore posizionato all'esterno della scuola
Microclima e Ventilazione	(HESE, 2006)	Q-TrackTM IAQ Monitor (misura di T, umidità e CO2): strumento di lettura diretta con un data logger integrato, che campiona intervalli medi di un minuto Lo strumento è stato posizionato a 0,9 m sopra il pavimento, con misurazioni eseguite in 2-4 ore, annotando il numero di persone in classe, il numero di finestre e di porte aperte. Il tasso di ricambio d'aria è stato calcolato a partire dalla concentrazione media di CO2 nell'aula.
Microclima e Ventilazione	(Canonica, 2014)	Periodo invernale: - Interno: T, umidità e velocità dell'aria – 7 giorni consecutivi (strumenti utilizzati: Bappu Evo + anemometro) - Esterno: T e umidità – 7 giorni consecutivi (strumento: termoigrometri Elpro Ecolog TH1) Periodo estivo: - Interno: T e umidità – 14 giorni consecutivi - Esterno: T e umidità – 14 giorni consecutivi Frequenza di campionamento: 5 minuti
Muffa	(World Health Organization - JRC, 2011)	1- Approccio più economico ma meno affidabile: questionario di autovalutazione su problemi di umidità / umidità / muffa nella scuola da amministrare all'amministrazione scolastica. 2- Approccio più costoso con risultati più affidabili: ispezioni scolastiche da parte di ispettori addestrati, con valutazione non distruttiva principalmente visiva e checklist + utilizzo di fotocamera, termocamera, termometri e misuratori di umidità. 3- Approccio combinato: sondaggio su un centinaio di scuole e ispezioni su un numero limitato di scuole risultati più problematiche.
Muffe e batteri	(HESE, 2006)	I microrganismi trasportati dall'aria sono stati campionati su filtri "Nucleopore" da 25 mm e una velocità di campionamento di 1,5 l/min per 4 ore. La concentrazione totale di muffe e batteri presenti nell'aria, rispettivamente, è stata determinata con il metodo CAMNEA (Palmgren et al., 1986).

NO2	(World Health Organization - JRC, 2011)	Concentrazioni medie settimanali - Campionatori di diffusione: utilizzate per caratterizzare l'entità del problema. (1 per aula + 1 esterno)
O3 e NO2	(HESE, 2006)	Campionamento con campionatori a diffusione in ogni classe e uno esterno per 7 giorni. I campionatori interni sono stati posizionati su una delle pareti dell'aula, a circa 1,5 m dal pavimento. I campionatori esterni sono stati collocati all'apertura di una scatola di plastica, appesi a una corda fuori da una finestra dell'aula, ben protetti dalla pioggia. È stato utilizzato il campionario "tipo di badge" completamente basato sulla teoria del campionamento per diffusione (Ferm e Svanberg, 1998; Ferm 2001a).
PM	(HESE, 2006)	Campionamento con P-Trak™, contatore di particelle ultrafini modello 8525 (in grado di misurare particelle con diametro fra 0,02 e 0,1 micrometri) e con Dust-Track™ (modello 8520), con un sensore di tipo fotometro laser a dispersione di luce a 90 gradi in grado di misurare particelle di circa 1- 10 micrometri (PM10) (TSI Incorporated, USA). Tempo di campionamento: 1-2 ore.
VOC	(HESE, 2006)	I VOC diversi dalla formaldeide sono stati misurati mediante campionamento attivo in parallelo su due tubi di carbone (Anasorb 747, SKC 226-81) e un tubo di polimero sintetico (XAD-7; SKC 226-95), con frequenza di campionamento di 0,2 l/min per ciascuna provetta e tempo di campionamento di 4h. Inoltre, sono stati utilizzati campionatori a diffusione ORSA-5 per misurare la concentrazione media di VOC nell'arco di 7 giorni.
VOC	(Canonica, 2014)	Prelievi passivi (1 settimana) con tubi di tipo Radiello o campionatori passivi SKC Ultra III, posizionati all'altezza di 2m al centro delle aule e 1 campionario posizionato all'esterno della scuola

Tabella 6 – Metodi di monitoraggio ambientale nelle scuole

6 Impatto della qualità dell'aria nelle scuole su performance/assenze di studenti e insegnanti

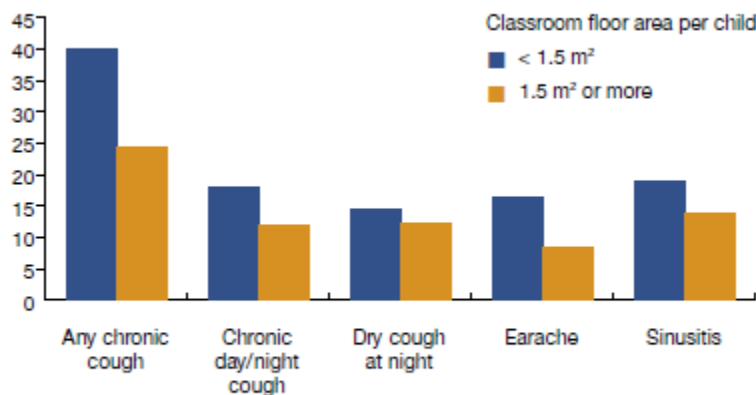
6.1 Influenza IAQ sulla salute

Diversi studi a livello mondiale dimostrano che la qualità dell'aria influenza la salute e le performance dei bambini. I bambini sono fisiologicamente molto più vulnerabili degli adulti, poiché il loro sistema immunitario è ancora immaturo, inoltre la concentrazione degli inquinanti è relativamente maggiore in un corpo di peso minore (Burtscher and Schüepp, 2012). Negli ultimi decenni si è verificato un aumento di asma bronchiale fra i bambini in età scolare nelle scuole europee (Kephalopoulos, Csobod, Bruinen de Bruin, et al., 2014) e in Italia l'asma e la rinite allergica, assieme all'obesità, sono le patologie croniche più diffuse nell'infanzia e nell'adolescenza (Galassi et al., 2006).

I risultati dello studio "Health Effects of School Environment" (HESE, 2006)⁸ e i risultati di altri studi condotti negli USA hanno evidenziato una correlazione fra esposizione a CO₂, PM e muffe e maggiori rischi di tosse secca notturna, rinite e tosse persistente (Baglioni et al., 2010), mentre l'ipertensione nei bambini è stata associata ad una eccessiva esposizione ai PM che possono provocare squilibrio del sistema nervoso autonomo e disfunzione vascolare arteriosa e/o vasocostrizione (Kelishadi et al., 2011).

I risultati del progetto SEARCH indicano che:

- Il sovraffollamento è correlato all'aumento di prevalenza di sintomi respiratori nei bambini. Il sovraffollamento è a sua volta correlato a maggiori concentrazioni di PM e di CO₂.



Source: data from the SEARCH project

Figura 12 – Percentuale di bambini con sintomi specifici per densità di occupazione della classe – Fonte: progetto SEARCH (Csobod, Rudnai, & Vaskovi, 2010)

- Esiste una correlazione fra scarsa ventilazione e manifestazione cronica di tosse.

⁸ Lo studio ha interessato 21 scuole europee con un monitoraggio costante della salute respiratoria di oltre 600 studenti italiani, svedesi, norvegesi, francesi e danesi.

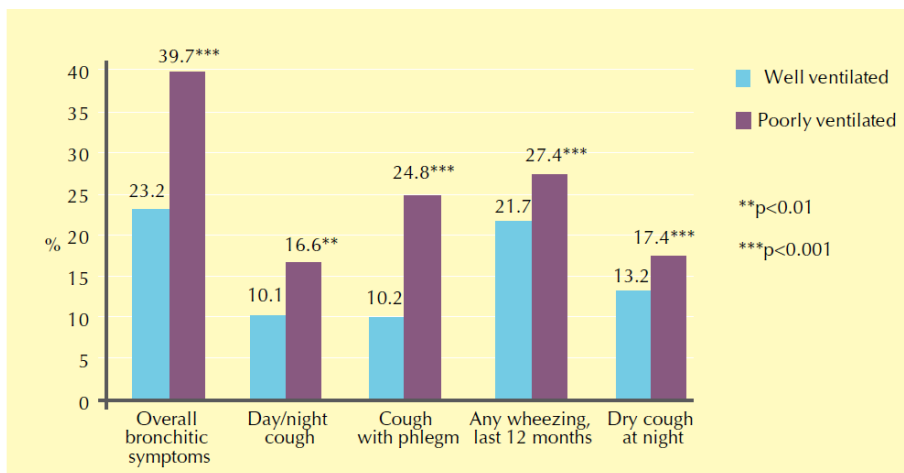


Figura 13 – Percentuale di bambini con malattie respiratorie croniche in classi ben ventilate e poco ventilate - Fonte: progetto SEARCH (Csobod et al., 2010)

6.2 Influenza della IAQ sulla performance e sull'assenteismo degli studenti

Studi di letteratura hanno indagato l'impatto della qualità dell'aria sulla performance e sull'assenteismo degli studenti. Diversi test sono riportati per la valutazione della performance, talvolta somministrati appositamente per le finalità di ricerca e talvolta già implementati nei sistemi scolastici dei paesi. I test più comunemente usati sono quelli matematici e di lettura, dove la performance viene espressa in termini di percentuale di errore, di tempo di risposta e/o di percentuale di studenti che superano positivamente il test.

Come evidenziato da Mendell & Heath nella loro analisi di letteratura, la qualità dell'aria può esercitare un'influenza sulla performance di tipo diretto o indiretto, causando in quest'ultimo caso malattie respiratorie e allergie a loro volta connesse con una riduzione della performance e con un incremento dell'assenteismo, associato a sua volta ancora a una riduzione di performance (Mendell & Heath, 2005). Un maggior assenteismo degli insegnanti e una loro riduzione di performance di insegnamento potrebbe portare infine ad un'ulteriore impatto negativo sulla performance degli studenti, sebbene tale aspetto non sia ancora documentato in letteratura (Mendell & Heath, 2005).

L'utilizzo di diverse metodologie per la valutazione della performance (e.g. tipologie di test, parametri di valutazione, condizioni di esposizione) rende difficile una meta-analisi dei dati di letteratura che porti ad una relazione quantitativa univoca tra la variazione dei parametri di ventilazione e la variazione di performance o di frequenza in aula. Ad ogni modo, un'analisi qualitativa della letteratura selezionata suggerisce:

- un miglioramento della performance scolastica al diminuire delle concentrazioni interne di CO₂ (Dorizas, Assimakopoulos, & Santamouris, 2015; Twardella et al., 2012), al crescere del tasso di ventilazione (BPIE, 2018; Dorizas et al., 2015; U. Haverinen-Shaughnessy, Moschandreas, & Shaughnessy, 2011; Ulla Haverinen-Shaughnessy, Shaughnessy, Cole, Toyinbo, & Moschandreas, 2015; Mendell & Heath, 2005; Wargocki & Wyon, 2013), al diminuire delle concentrazioni di inquinanti outdoor (Mohai, Kweon, Lee, & Ard, 2011) e in seguito alla realizzazione di taluni interventi di ristrutturazione scolastica (Stafford, 2015);
- una riduzione dell'assenteismo scolastico al diminuire delle concentrazioni interne di CO₂ (BPIE, 2018; Gaihre, Semple, Miller, Fielding, & Turner, 2014; Shendell et al., 2004), al diminuire delle concentrazioni interne di NO₂ (Mendell & Heath, 2005) e al diminuire delle concentrazioni di inquinanti outdoor (Mohai et al., 2011);
- nessuna evidenza di correlazione tra la quantità di polvere presente in aula e la performance degli studenti (Ulla Haverinen-Shaughnessy et al., 2015; Wargocki & Wyon, 2013).

I dettagli degli studi analizzati sono riportati in Tabella 7.

Documento di riferimento	Parametri relativi alla qualità dell'aria	Risultati
(BPIE, 2018)	Tasso di ricambio dell'aria. Concentrazione di CO2.	Tramite una meta-analisi dei dati ricavati dagli studi analizzati, lo studio riporta un incremento della performance accademica pari all'1% per ogni litro al secondo per persona (l/s/p) aggiuntivo nel tasso di ventilazione (fino a 15 l/s/p). Analogamente, per ogni decremento di 100 ppm nella concentrazione di CO2, si riporta una riduzione dello 0.5% nell'assenteismo per motivi di salute a scuola.
(Ulla Haverinen-Shaughnessy et al., 2015)	Tasso di ricambio dell'aria stimato sul livello di CO2. Quantità di polvere accumulata.	Non ci sono correlazioni significative tra parametri IEQ e assenteismo degli studenti. Associazione significativa e positiva tra la percentuale di studenti con risultati positivi in matematica e in test di lettura e tasso di ventilazione. La quantità di polvere accumulata non è correlata alla performance degli studenti.
(Dorizas et al., 2015)	Tasso di ricambio dell'aria. Concentrazione di CO2.	Lo studio riporta una correlazione positiva tra performance e tasso di ventilazione e una correlazione negativa tra performance e concentrazione di CO2 indoor. In particolare, un aumento del 17.01 % nella concentrazione di CO2 porta a una riduzione della performance del 16.13 %.
(Stafford, 2015)	Tipologia di intervento di ristrutturazione per il miglioramento della qualità dell'aria (risanamento da muffa, miglioramento della ventilazione, riparazione del tetto, impermeabilizzazione, drenaggio dell'acqua dal sito, lavori in intercapedine sottopavimento)	L'esecuzione di risanamenti da muffa e di interventi nell'impianto di ventilazione e di riparazione del tetto portano a miglioramenti nella performance di test matematici e di lettura. Nessun miglioramento è correlato alla realizzazione delle altre tipologie di intervento. L'intervento medio di risanamento da muffa (~\$500,000) porta ad un incremento della percentuale di superamento dei test del 3-4 %. L'intervento medio di miglioramento della ventilazione (~\$300,000) porta ad un incremento della percentuale di superamento dei test del 2-3%. Gli interventi di riparazione del tetto di maggiore entità (~\$100,000) sono correlati ad un incremento della percentuale di superamento dei test del 3%. Interventi con maggior budget associato hanno un impatto più rilevante sui risultati dei test. Gli interventi di ristrutturazione non hanno invece alcun effetto sull'assenteismo a scuola.
(Gaihre et al., 2014)	Concentrazione di CO2.	La concentrazione media di CO2 è correlata negativamente alla presenza media annuale in aula ma non alla performance scolastica. Un incremento di 100 ppm nella concentrazione di

		CO2 è associato ad una riduzione della presenza annuale in aula dello 0.2%, circa pari a mezza giornata di scuola all'anno.
(Wargocki & Wyon, 2013)	Tasso di ricambio dell'aria. Quantità di polvere accumulata.	Aumentando il tasso di ricambio dell'aria da 3.0 a 9.5 l/s/p la velocità di esecuzione di test numerici e di linguaggio migliora significativamente e, nel caso di uno dei test numerici, la percentuale di errori si riduce significativamente. La quantità di polvere nelle classi non è correlata alla performance degli studenti.
(Twardella et al., 2012)	Concentrazione di CO2.	L'incremento della concentrazione di CO2 nelle scuole (livello medio nella condizione più sfavorevole: 2115 ppm; livello medio nella condizione più favorevole: 1045 ppm) non ha effetto sulla performance di concentrazione degli studenti, misurata tramite il d2-test, ma incrementa il tasso di errore nell'esecuzione del test.
(Mohai et al., 2011)	Concentrazioni di inquinanti da sorgenti industriali nell'aria esterna alle scuole.	Le scuole situate in aree con alti livelli di inquinamento dell'aria esterna hanno percentuali inferiori di frequenza in aula e una maggiore percentuale di studenti che non supera test standardizzati di inglese e matematica.
(U. Haverinen-Shaughnessy et al., 2011)	Tasso di ricambio dell'aria stimato sul livello di CO2.	Lo studio riporta un trend lineare tra il tasso di ventilazione e la performance accademica degli studenti all'interno del range 0.9 – 7.1 l/s/p. Per ogni incremento unitario del tasso di ventilazione (1 l/s/p) la percentuale di studenti che supera un test standardizzato incrementa del 2.9% nel caso di un test matematico e del 2.7% nel caso di un test di lettura.
(Shaughnessy, Haverinen-Shaughnessy, Nevalainen, & Moschandreas, 2006)	Tasso di ricambio dell'aria stimato sul livello di CO2.	Lo studio riporta una tendenza di correlazione ($p < 0.10$) tra il tasso di ventilazione e i risultati di un test matematico, suggerendo un modello non lineare per rappresentare l'associazione.
(Mendell & Heath, 2005)	Tasso di ricambio dell'aria. Concentrazione di NO2.	L'analisi della letteratura effettuata dallo studio evidenzia una riduzione della frequenza scolastica per elevate concentrazioni interne di NO2. La revisione della letteratura suggerisce inoltre una riduzione della performance scolastica in presenza di bassi tassi di ventilazione.
(Shendell et al., 2004)	Differenza tra la concentrazione di CO2 interna e esterna (dCO2).	Un incremento pari a 1000 ppm nella differenza tra la concentrazione interna ed esterna di CO2 è associato a una riduzione dello 0.5-0.9% nella frequenza giornaliera media annuale, corrispondente ad un incremento del 10-20% dell'assenteismo da parte degli studenti.

Tabella 7 - Studi sull'impatto dell'IAQ sulla performance degli studenti

Una corretta valutazione economica delle strategie di ventilazione degli edifici dovrebbe considerare non solo i costi di capitale iniziali ed i costi energetici in uso associati, ma anche gli impatti sulla performance e sul benessere degli studenti. Questo richiede la monetizzazione di tali impatti per consentire la loro inclusione in analisi del Costo del Ciclo di Vita (Life Cycle Cost, LCC), analisi costi-benefici (Cost Benefit Analysis, CBA) o analisi multicriterio (Multi Criteria Decision Aid, MCDA).

Nello studio condotto da Shan et al., diverse soluzioni di ventilazione per ambienti universitari sono state comparate sulla base di un'analisi del loro Costo del Ciclo di Vita (LCC), integrando la monetizzazione di metriche legate al benessere degli studenti e alla loro performance scolastica (Shan, Melina, & Yang, 2018).

Nell'analisi, il benessere degli studenti è stato quantificato in funzione del numero di giorni di assenza per malattia, parametro che è stato monetizzato tenendo conto dei seguenti costi associati:

- il costo del capitale, pari alla quota di tasse scolastiche che sono state pagate ma non usufruite, a causa dell'assenza da scuola;
- il costo diretto, ovvero le spese mediche medie che i studenti devono affrontare presso cliniche o ospedali;
- il costo indiretto, pari alla quota media di spese che il governo deve garantire per ogni consultazione medica.

A questi costi, nel caso di studenti di età inferiore, andrebbe a sommarsi il costo di assunzione di una baby-sitter per assistere gli studenti durante i giorni di malattia (IEA, 2014).

Per quanto riguarda l'impatto sulla performance scolastica, la sua traduzione in termini monetari è stata condotta da Shan et al. correlando la performance attesa sulla base delle condizioni ambientali garantite da ciascuna strategia di valutazione con lo stipendio iniziale post lauream (Shan et al., 2018).

Infine, la valutazione richiede l'assegnazione di pesi ai differenti parametri coinvolti (costo iniziale, spese energetiche in esercizio, benessere e performance).

In assenza di un'ampia letteratura scientifica a supporto, tali tipologie di analisi sono accompagnate da grande margine di incertezza nello stabilire l'impatto delle condizioni ambientali attese sulla performance degli studenti e sul loro assenteismo e nel tradurre tali impatti in termini monetari. Ciò nonostante è importante includere nelle analisi delle alternative di ventilazione anche i costi ed i benefici associati a una differente qualità dell'aria, in termini sia di benessere che di apprendimento scolastico.

7 Buone pratiche e soluzioni

Esistono numerose linee guida contenenti i requisiti necessari per una buona gestione della qualità dell'aria nelle scuole sviluppate all'interno di progetti europei e iniziative nazionali, ad esempio:

- «Action Kit» buone pratiche per la gestione dell'aria indoor nelle scuole statunitensi redatto dall'EPA (Environmental Protection Agency)
- «Linee guida per un ambiente scolastico sano in Europa», Progetto SINPHONIE, 2014 (Kephelopoulos, Csobod, Bruinen de Bruin, et al., 2014)
- «Creazione di un ambiente interno sano nelle scuole», Società Internazionale di Qualità dell'Aria Interna e Clima (ISIAQ) 2001
- Linee guida OMS (WHO) per il residenziale

All'interno di queste linee guida sono riportate indicazioni su come prevenire i fattori che determinano le emissioni inquinanti dalle fonti interne, e altre azioni e misure che, se adottate, possono migliorare il comfort e la IAQ nelle scuole.

Si riportano alcuni esempi di misure specifiche "tecniche" da individuare caso per caso:

- assicurare un'adeguata ventilazione attraverso una corretta ventilazione naturale (vedi il progetto SIMARIA - Paragrafo 7.1),
- assicurare un'adeguata ventilazione attraverso l'introduzione di sistemi di ventilazione meccanica decentralizzati nelle aule (vedi Paragrafi 7.2 e 7.3),
- interventi di deumidificazione, eliminazione di perdite d'acqua/infiltrazioni/muffe,
- isolamento e pulitura di muri con pitture "fotocatalitiche" (vedi paragrafo 7.4),
- utilizzo di piante «mangia-veleni» (vedi paragrafo 7.4),
- rimozione di materiali contenenti inquinanti e utilizzo di materiali per arredamenti e rivestimenti a basse emissioni di inquinanti (es. certificati EcoLabel),
- revisione e sanificazione degli impianti HVAC.

Misure preventive:

- controllo periodico dello stato dell'edificio e monitoraggio periodico dei parametri della qualità dell'aria e del comfort (temperatura, umidità, CO₂ – livello consigliato inferiore ai 1000ppm, inquinanti da fonti indoor e outdoor),
- definizione della giusta frequenza degli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria,
- revisione dei protocolli di pulizia dei locali,
- sensibilizzazione e formazione continua a diversi livelli di responsabilità: del personale di servizio, degli insegnanti, della dirigenza scolastica, dei genitori e degli alunni (es. AirPack – SEARCH III⁹)

Nel documento di GARD-I (Baglioni et al., 2010) sono riportate anche indicazioni per la fase di progettazione/ristrutturazione degli edifici scolastici:

- adozione di sistemi edilizi, impiantistici ed in particolare di arredo, prediligendo quei metodi costruttivi e quei materiali che rispondano a requisiti di basso impatto sull'ambiente e sulla salute.
- attuazione di "policy" di certificazione ed adozione di materiali "ecosostenibili" (Ecolabel) e che risultino ipo-allergenici, oltre che atossici e non-nocivi,
- adozione di metodi progettuali, edilizi e materiali di consolidata, evidente e provata efficacia ed a ridotto o, meglio, assente impatto sulla salute e sull'ambiente, con particolare attenzione al grado di allergenicità.

⁹ <http://airpack.rec.org/index.php?page=home-italian>

7.1 Effetti dell’attuazione di piani per il ricambio dell’aria (progetto SIMARIA, Svizzera)

Fra il 2013 e il 2015, è stata svolta un’indagine con l’intento di stabilire se le scuole in Svizzera godessero di un buon ricambio di aria, che ha coinvolto 96 edifici scolastici dei cantoni di Berna, Grigioni e Vaud. Per 19 classi pilota è stato inizialmente rilevato che gli scolari trascorrevano il 18 per cento del tempo di lezione in presenza di un’aria ambiente ottima e per il 22 per cento buona; per il 31 per cento del tempo di lezione i valori si collocavano invece nella fascia dell’insufficienza.

In una seconda fase del progetto, sono stati testati gli effetti dei **piani per il ricambio di aria** generati con il **modello di simulazione SIMARIA** (<https://www.simaria.ch/it>) su un gruppo sperimentale costituito da 23 classi pilota. L’attuazione dei piani per il ricambio di aria elaborati da SIMARIA da parte di insegnanti e studenti ha portato a un massiccio aumento del tempo trascorso in condizioni di aria ottimali (il 42% del tempo con livello di CO₂ <1000 ppm e il 28% con valori compresi fra 1000 e 1400 ppm) e una riduzione drastica del tempo trascorso (9%) con livelli di CO₂ nella fascia dell’insufficienza.

Le conclusioni e i consigli derivanti da questa campagna sperimentale sono:

- un’adeguata formazione di insegnanti e studenti può favorire una migliore qualità dell’aria interna;
- arieggiare in modo sistematico (aiutati da modelli strategici come quello di SIMARIA) prima dell’inizio delle lezioni del mattino e del pomeriggio e nelle pause lunghe migliora notevolmente la qualità dell’aria;
- se si arieggia poco durante le pause lunghe o brevi, la qualità dell’aria durante la lezione successiva peggiorerà considerevolmente.



Figura 14 – Estratto del simulatore “SIMARIA”

Un'altra iniziativa promossa dalla provincia di Bolzano “**Aria viziata in classe**” ha evidenziato che, per mantenere una buona qualità dell’aria interna in aule senza ventilazione meccanica controllata, è necessario arieggiare correttamente almeno 5 minuti ogni mezz’ora. L’obiettivo dell’iniziativa è la corretta areazione delle aule scolastiche mostrando ai ragazzi e al personale docente, attraverso l’esperienza pratica, come, perché e quanto spesso si debba arieggiare in classe affinché l’aria “viziata” si trasformi in aria “buona”. L’iniziativa ha dimostrato come possa essere

migliorata la qualità dell'aria nelle aule, grazie ad una adeguata formazione pratica e fornendo strumenti di monitoraggio della concentrazione di CO2 direttamente agli studenti.

7.2 Integrazione di unità di ventilazione meccanica decentralizzate nelle aule

Nella costruzione della scuola Realschule di Lindau¹⁰ nel 2008, non era stato previsto un sistema di ventilazione nelle aule, con l'eccezione dei laboratori. Dopo aver riscontrato problemi di qualità dell'aria e di surriscaldamento estivo, è stata installata in ogni aula un'unità di ventilazione a soffitto decentralizzata con recupero di calore fino a 600 m³/h per un massimo di 30 alunni nella stanza, in grado di garantire una quantità di aria sufficiente, un'acustica accettabile e verificabile, uno sforzo di installazione limitato e un'impressione estetica generale. Ogni dispositivo è gestito attraverso sensori di CO2. Nel processo di selezione delle tecnologie sono stati coinvolti studenti e insegnanti e ciò ha contribuito ad ottenere un alto livello di accettazione delle apparecchiature di ventilazione nella scuola. Nei test, sono stati condotti sondaggi e test "crossover", durante i quali gli studenti si spostavano in stanze con diverse unità di ventilazione. Nella valutazione, il giudizio soggettivo non sempre concorda con quello secondo i valori misurati: ad esempio l'apparecchio "più rumoroso" ha avuto una valutazione più positiva di quanto ci si aspettasse.



Figura 15 – Unità di ventilazione decentralizzata adottata nella scuola di Lindau

All'interno del progetto europeo Bricker¹¹ sono state installate unità di ventilazione decentralizzate con recupero di calore ("Airria window ventilator") all'interno degli infissi.

Caratteristiche tecniche delle unità:

- Portata = 240 m³/h
- Lunghezza = 1.5 m
- Recupero di calore = 70%

¹⁰ http://www.komfortlüftung.at/fileadmin/komfortlueftung/Klassenzimmer/PM_TH_01_15_internetx.pdf

¹¹ Progetto BRICKER (Energy Reduction in Public Building Stock), finanziato dal 7° Programma Quadro della Comunità Europea - <http://www.bricker-project.com/>



Figura 16 - Particolari dell'unità di ventilazione Airria window ventilatorr - Fonte: <http://www.airria.be/page-product-details,Airria-AAerateur-fenAetre,,10,0.html>

7.3 Installazione di un sistema di ventilazione “Active Overflow” (Austria)

Il sistema di ventilazione “Active Overflow” è stato testato in alcune scuole fra cui la scuola Siegmair e la Neue Mittelschule Höttingdi Innsbruck (Austria), nell’ambito dei progetti europei SINFONIA¹² e 3ENCULT¹³.

Il sistema sfrutta il corridoio della scuola come zona di distribuzione e miscelazione dell’aria. Un sistema di recupero del calore centrale consente di ventilare le scale e i corridoi con aria fresca preriscaldata. L’aria passa dal corridoio all’aula attraverso un foro nel muro grazie a un ventilatore silenzioso e viene distribuita nell’aula grazie a un tubo in tessuto. Il flusso di ritorno dell’aria passa attraverso una griglia posizionata nella porta oppure attraverso estrattori che rimandano l’aria nel corridoio. L’efficienza di ventilazione di questo sistema è inferiore rispetto ad un sistema di ventilazione tradizionale, a causa della miscelazione tra aria di alimentazione e di estrazione nel corridoio. L’efficienza elettrica è più elevata e la strategia di controllo è piuttosto semplice ed efficace: il sistema entra in funzione almeno un’ora prima dell’inizio delle lezioni, inoltre entra in funzione quando viene superata la soglia limite di CO₂ misurata dai sensori posizionati nei corridoi. Questo sistema rappresenta un buon compromesso architettonico-impiantistico soprattutto nella riqualificazione di scuole in edifici storici, poiché la canalizzazione è ridotta al minimo.



Figura 17 – Silenziatore e prototipo di fanbox prodotto da ATREA – Fonte: “Active overflow ventilation for refurbishing of school buildings” 3ENCULT – Efficient Energy for EU Cultural Heritage

¹² SINFONIA - Smart INitiative of cities Fully cOmitted to iNvest In Advanced large-scaled energy; beginning year: 2014, project duration: five years; grant agreement no. 609019 - 7th EU Research Framework Programme for Smart Cities & Communities

¹³ EU FP7 project 3ENCULT: Efficient energy for EU cultural heritage; grant agreement no. 260162; www.3encult.eu

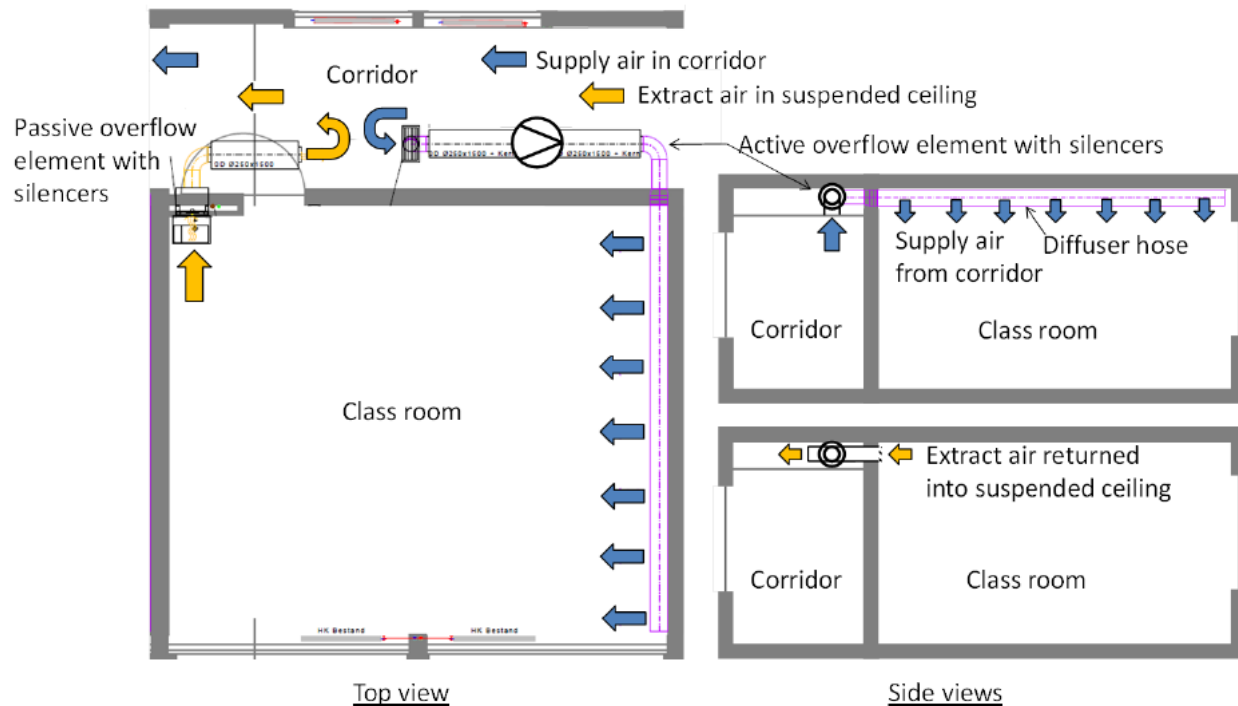


Figura 18 – Sistema “Active Overflow” sviluppato in una scuola austriaca: a sinistra la vista dall’alto, a destra la sezione trasversale dell’impianto di ventilazione – Fonte: “Reducing ventilation duct networks: Retrofit of the Siegmair School as part of the EU project SINFONIA”

7.4 Piante “mangia-veleni” e pitture fotocatalitiche

Nel documento del progetto SEARCH «Qualità dell’aria nelle scuole: Un dovere di tutti, un diritto dei bambini» (GASPARRINI & COLAIACOMO, 2011) viene suggerito l’introduzione di pitture fotocatalitiche e di piante “mangia-veleni” come misura per ridurre il livello di concentrazione di inquinanti.

Le pitture fotocatalitiche sono pitture cementizie con proprietà fotocatalizzanti che reagiscono con sostanze organiche e inorganiche (PM, VOC, ecc) in presenza di luce e aria e, attraverso un processo di fotossidazione, si trasformano in sali inorganici.

Tra i materiali fotocatalitici più usati merita di essere menzionato per le sue caratteristiche il biossido di titanio (TiO₂). Può infatti essere applicato a materiali cementizi, ma anche a pitture, intonaci e malte e consente di abbattere tra il 20% e il 70% di inquinanti in funzione delle condizioni atmosferiche e di irraggiamento, oltre naturalmente alla composizione delle sostanze inquinanti presenti. In presenza di radiazione ultravioletta, il biossido di titanio accelera la degradazione degli inquinanti in altri composti rimanendo inalterato.

Le piante “mangia-veleni”, studiate per anni dalla NASA per purificare l’aria delle navicelle spaziali, possono rimuovere formaldeide e altri VOC presenti nell’ambiente: il tasso di rimozione di alcune piante è riportato in Figura 19.

	Felce di Boston (Nephrolepis exaltata)	Rimuove al tasso di 20 microgrammi/ora la formaldeide dall'ambiente.
	Areca (Chrysalidocarpus lutescens)	Rimuove al tasso di 19 microgrammi/ora xilene e toluene dall'ambiente.
	Spatifillo (Spathyphyllum wallisii)	Rimuove al tasso di 19 microgrammi/ora di acetone, 13 microgrammi/ora di metanolo, 7 microgrammi/ora di benzene, 5 microgrammi/ora di ammoniaca e 3 microgrammi/ora di formaldeide dall'ambiente.
	Falangio variegato (Chlorophytum comosum "vittatum")	Rimuove al tasso di 7 microgrammi/ora di formaldeide dall'ambiente.
	Anturio (Anthurium andreanum)	Rimuove al tasso di 10 microgrammi/ora di ammoniaca, di 8 microgrammi/ora di xilene e toluene dall'ambiente.
	Ficus benjamina	Rimuove al tasso di 12 microgrammi/ora di formaldeide dall'ambiente.

Figura 19 - Alcuni esempi di piante capaci di metabolizzare le sostanze dannose che contribuiscono a creare l'inquinamento indoor (GASPARRINI & COLAIACOMO, 2011)

8 Bibliography

- Baglioni, A., Colaiacomo, E., De Maio, F., de Martino, A., De Mei, B., Ferraro, S., ... Vieg, G. (2010). *La qualità dell'aria nelle scuole e rischi per malattie respiratorie e allergiche*.
- Bernasconi, A., & Valsangiacomo, C. (2014). *Qualità dell'aria indoor*. (SUPSI - Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana, Ed.).
- BPIE. (2018). Building 4 People : Quantifying the benefits of energy renovation investments in schools , offices and hospitals.
- Canonica, P. (2014). *Masterarbeit zum Master of Advanced Studies in Arbeit + Gesundheit Détermination de la qualité de l'air et du confort thermique à l'intérieur des écoles enfantines construites avec standard Minergie*®.
- Csobod, E., Rudnai, P., & Vaskovi, E. (2010). *School Environment and Respiratory Health of Children (Search)*.
- Cumo, F., Caruso, G., Ferroni, L., & Paladino, E. (1994). L'INDICE DI VALUTAZIONE DELL'INDOOR AIR QUALITY COME INDICATORE DI SICUREZZA IN AMBIENTI LAVORATIVI CONFINATI, CON PARTICOLARE RIFERIMENTO AL TERZIARIO AVANZATO, 1–11.
- Dacarro, C., Grignani, E., Lodola, L., Grisoli, P., & Cottica, D. (2000). Proposta di indici microbiologici per la valutazione della qualità dell'aria degli edifici. *Giornale Italiano Di Medicina Del Lavoro Ed Ergonomia*, 22(3), 229–235.
- Dorizas, P. V., Assimakopoulos, M. N., & Santamouris, M. (2015). A holistic approach for the assessment of the indoor environmental quality, student productivity, and energy consumption in primary schools. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(5), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4503-9>
- European Respiratory Society. (n.d.). *EUROPEAN LUNG White book*.
- Gaihre, S., Semple, S., Miller, J., Fielding, S., & Turner, S. (2014). Classroom carbon dioxide concentration, school attendance, and educational attainment. *Journal of School Health*, 84(9), 569–574. <https://doi.org/10.1111/josh.12183>
- Galassi, C., De Sario, M., Biggeri, A., Bisanti, L., Chellini, E., Ciccone, G., ... others. (2006). Changes in prevalence of asthma and allergies among children and adolescents in Italy: 1994--2002. *Pediatrics*, 117(1), 34–42.
- GASPARRINI, G., & COLAIACOMO, E. (2011). *Qualità Dell'Aria Nelle Scuole: Un dovere di tutti, un diritto dei bambini*.
- Geiss, O., Giannopoulos, G., Tirendi, S., Barrero-Moreno, J., Larsen, B. R., & Kotzias, D. (2011). The AIRMEX study - VOC measurements in public buildings and schools/kindergartens in eleven European cities: Statistical analysis of the data. *Atmospheric Environment*, 45(22), 3676–3684. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.04.037>
- Haverinen-Shaughnessy, U., Moschandreas, D. J., & Shaughnessy, R. J. (2011). Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement. *Indoor Air*, 21(2), 121–131. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00686.x>
- Haverinen-Shaughnessy, Ulla, Shaughnessy, R. J., Cole, E. C., Toyinbo, O., & Moschandreas, D. J. (2015). An assessment of indoor environmental quality in schools and its association with health and performance. *Building and Environment*, 93(P1), 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.006>
- HESE. (2006). Health Effects of School Environment (HESE) Final Scientific Report, (January). Retrieved from http://ec.europa.eu/health/ph_projects/2002/pollution/fp_pollution_2002_frep_04.pdf
- IEA. (2014). Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency (International Energy Agency).

<https://doi.org/10.1787/9789264220720-en>

- Kephalopoulos, S., Csobod, É., Bruinen de Bruin, Y., & de Oliveira Fernandes, E. (2014). Linee guida per un ambiente scolastico sano in Europa. Retrieved from https://www.ediliziascolastica.it/wp-content/uploads/2018/03/II_Italian-Guidelines.pdf
- Kephalopoulos, S., Csobod, É., & de Oliveira Fernandes, E. (2014). *Guidelines for healthy environments within European schools. SINPHONIE Schools Indoor Pollution and Health Observatory Network in Europe. Publications Office of the European Union.* <https://doi.org/10.2788/89936>
- Landrigan, P. J., Fuller, R., Acosta, N. J. R., Adeyi, O., Arnold, R., Basu, N. N., ... Zhong, M. (2018). The Lancet Commission on pollution and health. *Lancet (London, England)*, *391*(10119), 462–512. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)32345-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0)
- M. Simoni, I. Annesi-Maesano, T. Sigsgaard, D. Norback, G. Wieslander, W. Nystad, M. Canciani, P. Sestini, G. V. (2010). School air quality related to dry cough, rhinitis and nasal patency in children. *European Respiratory Journal* *35*, 742–749. Retrieved from <https://erj.ersjournals.com/content/23/3/446>
- Marc O. Abadie, P. W. (2017). *Indoor Air Quality Design and Control in Low-energy Residential Buildings- Annex 68 | Subtask 1: Defining the metrics.* Retrieved from http://aivc.org/sites/default/files/AIVC_CR17_0.pdf
- Marc O. Abadie, P. W. (2018). *Indoor Air Quality Design and Control in Low-energy Residential Buildings- Annex 68 | Subtask 1: Defining the metrics | In the search of indices to evaluate the Indoor Air Quality of low-energy residential buildings.* Retrieved from <http://aivc.org/resource/cr-17-indoor-air-quality-design-and-control-low-energy-residential-buildings-annex-68>
- Mendell, M. J., & Heath, G. A. (2005). Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor Air*, *15*(1), 27–52. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00320.x>
- Mohai, P., Kweon, B. S., Lee, S., & Ard, K. (2011). Air pollution around schools is linked to poorer student health and academic performance. *Health Affairs*, *30*(5), 852–862. <https://doi.org/10.1377/hlthaff.2011.0077>
- Oliveira, M., Slezakova, K., Delerue-Matos, C., Pereira, M. C., & Morais, S. (2019). Children environmental exposure to particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons and biomonitoring in school environments: A review on indoor and outdoor exposure levels, major sources and health impacts. *Environment International*, *124*(October 2018), 180–204. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.052>
- Sarigiannis, D. A., Karakitsios, S. P., Gotti, A., Liakos, I. L., & Katsoyiannis, A. (2011). Exposure to major volatile organic compounds and carbonyls in European indoor environments and associated health risk. *Environment International*, *37*(4), 743–765.
- Shan, X., Melina, A. N., & Yang, E. H. (2018). Impact of indoor environmental quality on students' wellbeing and performance in educational building through life cycle costing perspective. *Journal of Cleaner Production*, *204*, 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.002>
- Shaughnessy, R. J., Haverinen-Shaughnessy, U., Nevalainen, A., & Moschandreas, D. (2006). A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms and student performance. *Indoor Air*, *16*(6), 465–468. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2006.00440.x>
- Shendell, D. G., Prill, R., Fisk, W. J., Apte, M. G., Blake, D., & Faulkner, D. (2004). Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*, *14*(5), 333–341. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x>
- Simoni, M., Cai, G.-H., Norback, D., Annesi-Maesano, I., Lavaud, F., Sigsgaard, T., ... others. (2011). Total viable molds and fungal DNA in classrooms and association with respiratory health and pulmonary function of

European schoolchildren. *Pediatric Allergy and Immunology*, 22(8), 843–852.

Stafford, T. M. (2015). Indoor air quality and academic performance. *Journal of Environmental Economics and Management*, 70, 34–50. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2014.11.002>

Timea Beregszaszi, Burali, A., Calzoni, J., Colaiacomo, E., Csobod, E., Kocic, A., ... Vaskovi, E. (2013). *Making Schools Healthy : Meeting Environment and Health Challenges Final publication of the SEARCH II project*. Retrieved from http://search.rec.org/outcomes/uploads/documents/SearchMakingSchoolsHealthy_Web_Dec2013.pdf

Twardella, D., Matzen, W., Lahrz, T., Burghardt, R., Spiegel, H., Hendrowarsito, L., ... Fromme, H. (2012). Effect of classroom air quality on students' concentration: Results of a cluster-randomized cross-over experimental study. *Indoor Air*, 22(5), 378–387. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2012.00774.x>

United States Environmental Protection Agency. (2015). Indoor Air Quality Tools for Schools – Reference Guide.

Wargocki, P., & Wyon, D. P. (2013). Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment*, 59, 581–589. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.007>

World Health Organization - JRC. (2011). *Methods for monitoring indoor air quality in schools. Report of a meeting, Bonn, Germany*.

ANNEX A - Livelli di esposizione e valori limite

La concentrazione degli agenti inquinanti non è sufficiente per determinare gli effetti sulla salute dei bambini e degli insegnanti; è necessario definire anche la durata dell'esposizione: i Valori Limite di Esposizione (VLE o in inglese ELV) a lungo termine o a breve termine. I VLE sono stabiliti a livello nazionale e mondiale da comitati di esperti tra cui medici di medicina, tossicologia, chimica, igienisti, farmacisti, ecc.

Come riportato nel (Marc O. Abadie, 2017) esistono due livelli di VLE:

- Valori di riferimento della tossicità (TRV): sono determinati per molti composti utilizzando i dati ottenuti negli esperimenti su animali. I limiti ottenuti negli studi con animali sono stati usati per stabilire i limiti per l'uomo applicando un fattore di sicurezza di almeno 100 (per esempio, se gli effetti sulla salute negli esperimenti su animali compaiono a $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, il TRV per un essere umano è fissato a $\leq 10 \mu\text{g} / \text{m}^3$);
- Valori indicativi per l'aria indoor (IAGV): vengono determinati utilizzando i dati degli studi epidemiologici che esaminano la correlazione tra i sintomi di salute osservati in una popolazione di individui esposti al composto al chiuso. Sono disponibili solo per il numero limitato di composti.

In linea con il paradigma della tossicologia "è la dose che rende il veleno", devono essere considerati sia il livello di concentrazione che la durata dell'esposizione (durata). Di conseguenza, è possibile trovare diversi TRV o IAGV per tempi di esposizione diversi per un singolo inquinante in base al tempo medio. Un esempio è il limite di esposizione per la formaldeide che è $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per 30 min (esposizione a breve termine da WHO, 2010b) e $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per 1 anno (esposizione a lungo termine da ANSES, 2007).

Esistono diverse linee guida sui limiti di concentrazione degli inquinanti in ambienti indoor. Per lo più, si fa riferimento alle linee guida elaborate da:

- Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS);
- Environmental Protection Agency (EPA);
- American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE).

In virtù degli "effetti collaterali" di queste sostanze, l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS, inglese WHO) raccomanda il non superamento dei valori limite di concentrazione per i seguenti inquinanti indoor:

Inquinante Limite di concentrazione in aria	Tempo di esposizione	Limite di concentrazione in aria	
		$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Ppm

Benzene	-	Non esiste limite di sicurezza	-
	1 anno	17 (con un rischio unitario di 1/10000)	5**
CO	15 minuti	100000 ^a	-
	1 ora	35000 ^a	-
	8 ore	10000 ^a	9
	24 ore	7000 ^a	-
Formaldeide	30 minuti	100 ^a	-
Naftalene	1 anno	10 ^a	-
NO2	1 ora	200 ^a	-
	1 anno	40 ^a	-
PM10	24 ore	50	-
	1 anno	20-40	-
PM2.5	24 ore	25	-
	1 anno	10-15	-
PM totale	1 anno	100*	-
O3	8 ore	100	0.06
TVOC	1 ora	500	-
IPA	-	1.2 (con un rischio unitario di cancro pari a 1/10000)	-
Radon	-	400 Bq/m ³	-
Toluene	1 settimana	260*	-
Tetracloroetilene	1 anno	250 ^a	-
Tricloroetilene	-	Non esiste limite di sicurezza	-
Xylene	24 ore	4800	-
	1 anno	870	-
CO₂	-	-	1000

^a WHO Regional Office for Europe (2010b)

*Linee guida OMS (WHO Air Quality Guidelines - Outdoor, 2000 e 2005)

**Direttiva 2008/EC/50

***ASHRAE 62.1-2004

Figura 20 – Limite di concentrazione degli inquinanti consigliato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità e altri standard internazionali

Gli esperti internazionali partecipanti al progetto IEA Annex 68 "Indoor air quality design and control in low energy residential buildings", partendo dai valori proposti da diverse organizzazioni a livello mondiale, propongono i seguenti livelli massimi di concentrazione degli inquinanti, suddivisi a seconda del periodo di esposizione.

	Long-term ELV** [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]*	Short-term ELV** [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]*
Acetaldeide	48	4600
Acroleina	0.35	6.9
Acrilonitrile	5	-

α -pinene	200	-
Ammoniaca	70	3200
Benzene	0.2	110
Anidride carbonica (CO₂) [ppm]	-	1250 ppm
Disolfuro di carbonio	800	6200
Monossido di carbonio (CO)	-	100
Tetracloruro di carbonio	40	1900
Clorobenzene	1000	-
Cloroformio	300	150
Diclorometano	200	-
Etilbenzene	-	3800
Formaldeide	9	123
Metil etil chetone	-	13000
Naftalina	2	-
Diossido di azoto (NO ₂)	20	470
Ozono	-	180
Pentaclorofenolo	100	-
PM10	20	50
PM2.5	10	25
Radon [Bq/m³]	200 Bq/m³	400 Bq/m³
Styrene	30	21000
Diossido di zolfo	-	660
Tetracloroetilene	100	1380
Toluene	250	37000
Tricloroetilene	2	-
TVOC	-	600
Cloruro di vinile	-	180000
Metil etil chetone	200	22000

* Concentrazione di ELV in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ad eccezione dell'anidride carbonica in ppm e del radon in Bq/m^3 .

**Per "short-term" si intende un periodo di tempo inferiore alle 24h, mentre per "long-term" si intende una esposizione prolungata per un periodo superiore alla settimana.

Tabella 8 – Elenco dei livelli di esposizione (VLE) a lungo e breve termine utilizzati per selezionare gli inquinanti rilevanti per l'Annex 68 (Marc O. Abadie, 2017)