

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/351441612>

# Rischio COVID-19 via Aerosol nelle Scuole Note bibliografiche, esempi di interventi, e loro dimensionamento

Technical Report · May 2021

DOI: 10.13140/RG.2.2.18941.28643

CITATIONS

0

READS

596

1 author:



Luigi Moccia

Italian National Research Council

44 PUBLICATIONS 1,283 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Technology Selection and Design of a Transit Line [View project](#)



# **Rischio COVID-19 via Aerosol nelle Scuole**

**Note bibliografiche, esempi di interventi, e loro dimensionamento**

Luigi Moccia <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Consiglio Nazionale delle Ricerche—ICAR

[luigi.moccia@icar.cnr.it](mailto:luigi.moccia@icar.cnr.it)

9 maggio 2021

# 1. Sintesi

I protocolli scuola-covid andrebbero rafforzati alla luce delle nuove evidenze scientifiche sulla trasmissione del SARS-CoV-2 via aerosol. Attualmente i protocolli scuola-covid mitigano solo il rischio contagio via goccioline (*droplet*) grazie a mascherine, igiene superfici, e distanza di un metro tra rime buccali. Purtroppo, tali misure sono insufficienti rispetto al contagio via aerosol (particelle di diametro tale da rimanere in sospensione per ore nell'aria). Per ridurre il rischio contagio via aerosol sono necessarie misure specifiche sulla ventilazione che solo in parte, grazie al buon senso dei professori che tengono aperte le finestre, vengono applicate. Le linee guida internazionali stanno orientandosi su un fabbisogno di ricambio d'aria per un'aula scolastica dell'ordine dei sei volumi per ora [Allen et al., 2020]. Tali volumi di ricambio d'aria sono difficilmente realizzabili, soprattutto d'inverno, con la sola apertura delle finestre, per via dei disagi che le correnti d'aria, i rumori esterni, e altri fattori possono causare. Sebbene sia comunque importante valutare in ogni edificio scolastico il massimo utilizzo della ventilazione naturale, non sempre sussistono le condizioni architettoniche per un uso esclusivo di questa opzione. In questo rapporto si motivano interventi di breve e medio periodo sulla ventilazione delle aule scolastiche. Nel breve periodo sono necessari i seguenti interventi:

1. verifica tecnica delle condizioni di ventilazione nelle aule in base alla norma EN 16798-1;
2. massimizzazione della ventilazione naturale effettivamente praticabile con l'ausilio decisionale di sensori di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>);
3. installazione di filtri portatili certificati HEPA (i cosiddetti purificatori) per sopperire all'eventuale deficit di ventilazione valutato con gli interventi 1 e 2.

Nelle more di questi adeguamenti, le aule scolastiche con insufficiente ventilazione rappresentano un rischio per contagio via aerosol, e dovrebbero essere sospese le deroghe che questi luoghi pubblici hanno sulla loro inagibilità. Nel medio periodo l'intervento proposto è la completa infrastrutturazione delle scuole con impianti di ventilazione stato dell'arte.

L'opinione pubblica in Italia ha poca conoscenza di questi aspetti, sebbene i decisori pubblici abbiano esaustiva documentazione di queste criticità. Per esempio, il Ministero della Salute ha a disposizione dei dati sulla qualità dell'aria nelle scuole italiane ed europee. I risultati sono pessimi per le scuole italiane che sono tra le peggiori d'europa su questo criterio. Per fornire un dato quantitativo basta menzionare che la ventilazione media che viene garantita per studente in una scuola italiana risulta essere più di cinque volte inferiore rispetto a quella che è invece offerta nelle scuole svedesi. Questo solo dato invalida i confronti internazionali sulle scelte tra scuola in presenza vs didattica a distanza che alcuni commentatori propongono senza adeguate correzioni per le diverse dotazioni infrastrutturali tra paesi. Si osserva, inoltre, che le nuove linee guida dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) per la ventilazione nelle scuole al fine di mitigare il rischio covid richiedono livelli *minimi* tre volte *superiori* a quelli comuni nelle scuole italiane [WHO, 2021a]. Per superare queste carenze infrastrutturali sono necessari investimenti sia di breve che di medio periodo. Le misure descritte in questo documento sono a "rimpianto zero", in quanto offrono co-benefici di salute pubblica e di apprendimento che vanno al di là della risposta all'emergenza del nuovo coronavirus.

Il riconoscimento del rischio di contagio via aerosol ha anche altre necessarie ricadute sull'innalzamento dei livelli di protezione dei dispositivi individuali (mascherine FFP2) e sul tracciamento che deve considerare criteri più larghi per la definizione di "contatto". Su questo ultimo aspetto si rimanda alle valutazioni contenute nell'appello di Priesemann et al. [2021a], sottoscritto da centinaia di ricercatori e tradotto anche in italiano [Priesemann et al., 2021b]. Secondo Priesemann et al., per l'efficacia di un sistema di test, tracciamento e isolamento (TT&I) non deve essere superata la soglia dei dieci nuovi casi al giorno per milione di abitanti. In Italia il comitato tecnico-scientifico (CTS) fa spesso riferimento a una soglia per l'efficacia del TT&I pari a 50 nuovi casi a settimana per 100mila abitanti. La soglia di Priesemann et al. in quest'ultima unità di misura corrisponde a 7 nuovi casi a settimana per 100mila abitanti. La soglia CTS dei 50 nuovi casi a settimana per 100mila abitanti è quindi ben sette volte maggiore di quella che trova il consenso di un'ampia e qualificata parte della comunità scientifica internazionale.

## **1.1. Organizzazione del documento**

La restante parte di questo documento è organizzata come segue. I principali riferimenti scientifici sul rischio di contagio COVID-19 via aerosol e confronti internazionali di successo e di



insuccesso nella risposta alla pandemia sono presentati nella Sezione 2. Lo stato della ventilazione nelle scuole italiane è descritto nella Sezione 3. Una risposta comune, ma tecnicamente *naïf*, all'insufficienza della ventilazione nelle scuole è quella sintetizzabile con la frase "aprire un po' di più le finestre". La Sezione 4 sfata questo luogo comune. Gli interventi di breve e medio periodo, i loro dimensionamenti di massima, e il risultante quadro economico degli investimenti sono presentati nella Sezione 5. Questi interventi hanno un quadro di co-benefici sintetizzati e referenziati nella Sezione 6. Nell'appendice si riportano delle schede di approfondimento, la bibliografia, e le tavole dei contenuti.

## 2. Rischio contagio COVID-19 via aerosol

La Sezione 2.1 presenta un excursus della letteratura scientifica sul nesso aerosol-COVID-19 che ha portato a fine aprile 2021 alla revisione delle linee guida dell'Organizzazione Mondiale della Sanità. La Sezione 2.2 discute gli effetti della sottovalutazione di tale nesso nei primi 14 mesi della pandemia.

### 2.1. Note bibliografiche su aerosol-COVID-19

A luglio 2020 Morawska and Milton [2020] pubblicano una lettera aperta, sottoscritta da 239 ricercatori, in cui criticano l'interpretazione che la trasmissione del SARS-CoV-2 avvenga esclusivamente attraverso goccioline (*droplet*). Le *droplet* sono di dimensioni tali da cadere per gravità con traiettoria balistica nelle immediate vicinanze della persona che le emette. Secondo questi autori, esiste un rischio contagio attraverso micro-goccioline assimilabili in termini di fluidodinamica all'aerosol, Fig. 2.1. L'aerosol rimane sospeso nell'aria per tempi lunghi e può essere così trasportato a distanze maggiori di quelle delle *droplet*. L'analogia è con il fumo di sigaretta [Tang et al., 2021], che, pur concentrandosi vicino a chi lo emette, è presto percepibile in ogni punto di un locale di grandezza pari a quella, per esempio, di un'aula scolastica. Ne consegue l'insufficienza della sola distanza come misura di riduzione del rischio, Fig. 2.2.

Questa interpretazione sul rischio di contagio via aerosol riceve nella seconda metà del 2020 l'attenzione di comitati tecnico-scientifici di supporto alla risposta pandemica in alcuni paesi. Citiamo il documento pubblicato ad ottobre 2020 dal Consiglio Scientifico del governo svizzero, [NCS-TF, 2020], e i documenti del comitato tecnico-scientifico del Regno Unito [SAGE, 2020a,b]. Purtroppo non possiamo segnalare una comparabile attenzione del CTS italiano. A febbraio 2021, un editoriale su Nature critica l'errato focus nella risposta alla pandemia sulla via di contagio da contatto di superfici, invece che sull'aerosol [Editorial, 2021]. A marzo 2021, il comitato sulla sicurezza negli edifici della commissione COVID-19 di *The Lancet* segnala che il tracciamento dei contagi è spesso inficiato da una mancata inclusione dei fattori relativi alla

ventilazione dei locali interni [Allen et al., 2021]. Notiamo come questa co-dipendenza tra paradigma interpretativo della modalità di trasmissione, *droplet vs aerosol*, e studi di tracciamento dei contagi abbia rallentato la comprensione dei meccanismi dell'epidemia e contribuito alla sua sottovalutazione: non si trova ciò che non si cerca. Per una discussione di questo aspetto sull'epidemiologia in ambito scolastico si veda e.g. Johnson et al. [2021]. Recentemente, Greenhalgh et al. [2021] passano in rassegna le dieci linee di evidenze che supportano l'interpretazione della trasmissione via aerosol e concludono che questa sia la via *predominante* di contagio del nuovo coronavirus.

Finalmente, il giorno 30 aprile 2021, l'OMS rivede le sue indicazioni sul contagio COVID-19 includendo il rischio aerosol sia nel corto raggio che all'interno di locali poco ventilati [WHO, 2021b]. Nella documentazione precedente a quella data l'OMS sottovalutava la trasmissione aerea del nuovo coronavirus, ritenendola possibile solo in casi rari. Come sarà discusso nella sezione seguente, i locali poco ventilati non rappresentano affatto l'eccezione, soprattutto nelle scuole in Italia.

Sebbene questa discussione scientifica possa sembrare remota rispetto alle preoccupazioni quotidiane dei cittadini in una pandemia, è invece dirimente perché le regole a cui ci si deve attenere in tanto sono ben applicate in quanto se ne comprende la razionalità.

## 2.2. Un pesante bilancio

È palese il fallimento nel contenimento della pandemia dei paesi occidentali come l'Italia che hanno basato i loro protocolli di mitigazione e tracciamento sul paradigma *droplet* rispetto a paesi "previdenti" come quelli dell'Asia Orientale (Cina, Corea del Sud, Giappone, Vietnam, Taiwan, etc) e dell'Oceania (Australia e Nuova Zelanda). Questi paesi hanno reagito al SARS-CoV-2 in base ai protocolli messi a punto nelle precedenti epidemie SARS-CoV-1 e MERS, riconosciuti come patogeni a diffusione aerea. Sia le misure di prevenzione che di tracciamento adottate da questi paesi per il SARS-CoV-2 sono state implicitamente basate sul rischio contagio via aerosol. L'obiezione che i protocolli di prevenzione inclusivi del rischio aerosol siano non giustificati perché più costosi di quelli limitati al rischio *droplet* va rigettata per la grande differenza di scala tra i danni, anche solo economici, subiti dai paesi come l'Italia rispetto a quelli, molto più contenuti, dei paesi previdenti summenzionati. La parte migliore degli studi di area economica ha riconosciuto come non esistente un *trade-off* tra il contenimento di questa

Figura 2.1.: "Goccioline" vs "aerosol"

"Goccioline", "micro-goccioline", "aerosol", sono termini che autori diversi interpretano in maniera diversa.

In questo documento le "goccioline" sono le particelle emesse con la respirazione, il parlato, gli starnuti o la tosse di una dimensione tale da cadere velocemente per gravità, quindi con traiettoria balistica, nelle immediate vicinanze di chi le emette (in blu nella figura). "Micro-goccioline" o "aerosol" sono invece le particelle emesse con le stesse modalità delle goccioline ma di una dimensione minore tale da rimanere in sospensione nell'aria anche per periodi lunghi in assenza di ricambio con aria esterna o filtrazione (in rosso).



Tra i due tipi di particelle non esiste una soglia dimensionale netta, ma in letteratura il diametro soglia indicativo è pari a  $100\text{ }\mu\text{m}$  [Marr et al., 2020].

pandemia e l'economia, in quanto i due obiettivi sono sinergici, non contrapposti [Oliu-Barton et al., 2021]. Le opinioni di chi insiste su tale *trade-off* sono basate su modelli semplicistici e fallaci che non colgono le non-linearità dei costi delle misure e dei danni sociali, sanitari, ed economici al superamento di soglie critiche nell'ambito di un fenomeno esponenziale come quello di questa pandemia [Janssen and Bar-Yam, 2021].

Figura 2.2.: Relatività del distanziamento

Ad agosto 2020 Jones et al. [2020] propongono una classificazione del rischio COVID-19 che distingue tra eventi all'aperto e in locali interni, e per gli eventi all'interno distingue ulteriormente in base alla ventilazione. Lo schema, inoltre, distingue per durata dell'evento, tipo di attività, e utilizzo di dispositivi di protezione individuale per un totale di 72 tipi di eventi classificati in tre fasce di rischio, tabella (a).

Type and level of group activity	Low occupancy			High occupancy		
	Outdoors and well ventilated	Indoors and well ventilated	Poorly ventilated	Outdoors and well ventilated	Indoors and well ventilated	Poorly ventilated
<b>Wearing face coverings, contact for short time</b>						
Silent	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow
Speaking	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow
Shouting, singing	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Red
<b>Wearing face coverings, contact for prolonged time</b>						
Silent	Green	Green	Yellow	Green	Yellow	Red
Speaking	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Red
Shouting, singing	Green	Yellow	Red	Yellow	Red	Red
<b>No face coverings, contact for short time</b>						
Silent	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Red
Speaking	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red
Shouting, singing	Yellow	Yellow	Red	Yellow	Red	Red
<b>No face coverings, contact for prolonged time</b>						
Silent	Green	Yellow	Red	Yellow	Red	Red
Speaking	Yellow	Yellow	Red	Red	Red	Red
Shouting, singing	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red

Risk of transmission  
Low Medium High  
\* Borderline case that is highly dependent on quantitative definitions of distancing, number of individuals, and time of exposure

(a)

Peng et al. [2021] utilizzano un modello quantitativo per sostanziare la classificazione qualitativa di Jones et al. [2020]. Viene introdotto un ulteriore tipo di attività, quella dell'intensa attività fisica, che induce rischi maggiori per la maggiore attività respiratoria. Grazie al proposto indicatore quantitativo è possibile assegnare una gradazione di rischio più fine di quella di Jones et al. [2020] che evidenzia la maggiore criticità degli eventi all'interno e soprattutto dei locali poco ventilati, tabella (b).

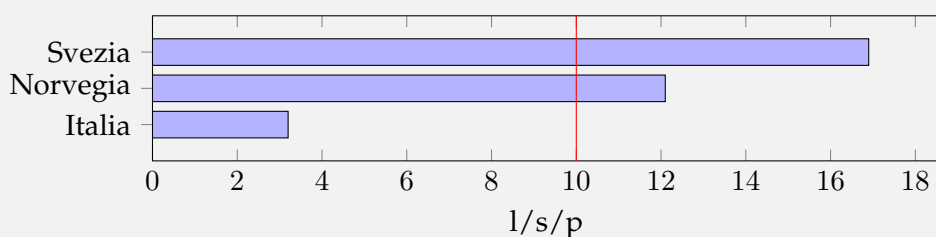
Type and level of group activity	Low occupancy			High occupancy		
	Outdoor and well ventilated	Indoor and well ventilated	Poorly ventilated	Outdoor and well ventilated	Indoor and well ventilated	Poorly ventilated
<b>Wear face coverings, contact for short time</b>						
Silent	2.33E-05	1.17E-03	1.17E-02	2.33E-04	1.17E-02	1.17E-01
Speaking	1.17E-04	5.83E-03	5.83E-02	1.17E-03	5.83E-02	5.83E-01
Shouting, singing	7.00E-04	3.50E-02	3.50E-01	7.00E-03	3.50E-01	3.50E+00
Heavy exercise	1.63E-03	8.17E-02	8.17E-01	1.63E-02	8.17E-01	8.17E+00
<b>Wear face coverings, contact for prolonged time</b>						
Silent	2.33E-04	1.17E-02	1.17E-01	2.33E-03	1.17E-01	1.17E+00
Speaking	1.17E-03	5.83E-02	5.83E-01	1.17E-02	5.83E-01	5.83E+00
Shouting, singing	7.00E-03	3.50E-01	3.50E+00	7.00E-02	3.50E+00	3.50E+01
Heavy exercise	1.63E-02	8.17E-01	8.17E+00	1.63E-01	8.17E+00	8.17E+01
<b>No face coverings, contact for short time</b>						
Silent	6.67E-05	3.33E-03	3.33E-02	6.67E-04	3.33E-02	3.33E-01
Speaking	3.33E-04	1.67E-02	1.67E-01	3.33E-03	1.67E-01	1.67E+00
Shouting, singing	2.00E-03	1.00E-01	1.00E+00	2.00E-02	1.00E+00	1.00E+01
Heavy exercise	4.67E-03	2.33E-01	2.33E+00	4.67E-02	2.33E+00	2.33E+01
<b>No face coverings, contact for prolonged time</b>						
Silent	6.67E-04	3.33E-02	3.33E-01	6.67E-03	3.33E-01	3.33E+00
Speaking	3.33E-03	1.67E-01	1.67E+00	3.33E-02	1.67E+00	1.67E+01
Shouting, singing	2.00E-02	1.00E+00	1.00E+01	2.00E-01	1.00E+01	1.00E+02
Heavy exercise	4.67E-02	2.33E+00	2.33E+01	4.67E-01	2.33E+01	2.33E+02

(b)

### 3. Il pessimo stato della ventilazione nelle scuole in Italia

Le scuole italiane sono tra le peggiori d'europa in termini di ricambi d'aria per studente. Un rapporto tecnico del Ministero della Salute, ["GRUPPO GARD-I", 2011], evidenzia sulle base di studi pubblicati su riviste internazionali, [Simoni et al., 2010, 2011], come nelle scuole italiane testate nell'ambito di un progetto europeo in media si abbia un ricambio d'aria pari a 3,2 litri al secondo a persona (l/s/p). I livelli di ventilazione disponibili agli studenti sono notevolmente maggiori in quei paesi dove, a differenza dell'Italia, gli impianti di ventilazione sono lo standard. In Svezia, le scuole garantiscono livelli di ventilazione più di cinque volte maggiori, pari a 16,9 l/s/p, e in Norvegia circa quattro volte maggiori, 12,1 l/s/p, dei valori medi in Italia, Fig. 3.1. Un recente monitoraggio della qualità dell'aria, conclusosi a giugno 2020, in licei della provincia di Roma ha rilevato insufficienti livelli di ventilazione simili a quelli summenzionati [Agorà et al., 2020].

Figura 3.1.: Ventilazione media nelle aule scolastiche in Italia e in paesi europei dove gli impianti di ventilazione sono comuni



Ventilazione media in litri al secondo per persona (l/s/p) nelle aule scolastiche, fonte dei dati pag. 27 di ["GRUPPO GARD-I", 2011], in rosso la soglia WHO [2021a], Fig. 3.2.

Recentemente, un rapporto tecnico dell'Organizzazione Mondiale della Sanità, WHO [2021a], ha indicato come necessario per la riduzione del rischio covid un ricambio d'aria nelle scuole

pari ad almeno 10 l/s/p , Fig. 3.2. Questa indicazione dell’OMS si riferisce ad una norma tecnica europea, la EN 16798-1, che è vigente in Italia, ma è raramente applicata. Notiamo che modelli di valutazione del rischio specifici per le aule scolastiche evidenziano che in scenari di caso peggiore anche una ventilazione di 10 l/s/p può risultare insufficiente [Stabile et al., 2021].

Purtroppo, l’agibilità degli edifici pubblici in termini di ventilazione non è un criterio comunemente considerato, altrimenti un gran numero di edifici pubblici in Italia, e in particolare quelli scolastici, andrebbe chiuso per questa inadempienza. Le deroghe e le sottovalutazioni di questo cruciale aspetto dell’agibilità dei locali pubblici, e in particolare delle scuole, andrebbero pertanto riconsiderate.

Figura 3.2.: Estratto dal documento WHO [2021a] sulla ventilazione per ridurre il rischio contagio COVID-19

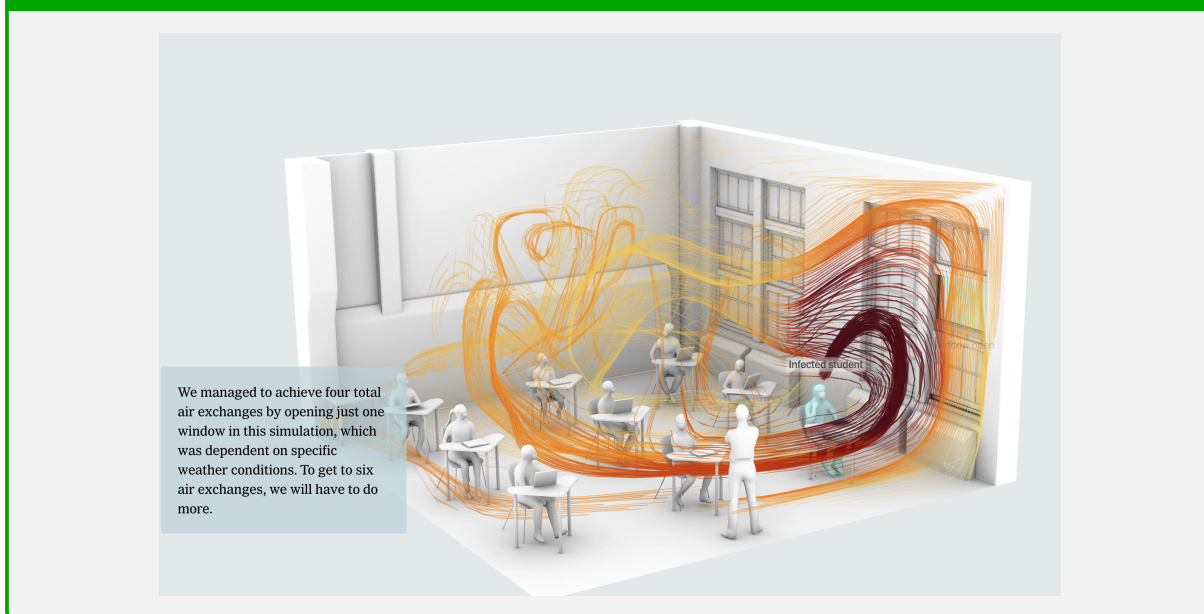
	Minimum requirements	Steps – key questions
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La norma EN 16798-1 è vigente in Italia, ma trova rara applicazione.</li> <li>• Il valore di ventilazione <b>minimo</b> da linee guida OMS di 10 l/s/p corrisponde a 36 m<sup>3</sup>/h a persona.</li> </ul>	<p>Minimum recommended ventilation rate:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 L/s/person (EN 16798-1) (42, 43)</li> </ul>	<p>Does the ventilation rate meet the minimum requirement? To estimate the ventilation rate consult point 2.</p>



## 4. Ventilazione naturale, opportunità e limiti

L'importanza della ventilazione naturale, e i suoi limiti, per la riduzione del rischio covid è stata efficacemente divulgata da una infografica del The New York Times [2021]. Notia-

Figura 4.1.: Infografica del The New York Times [2021] su una simulazione basata sulla fluidodinamica dell'aerosol in un'aula scolastica



mo come in questa simulazione, Fig. 4.1, si abbia un esempio di aula architettonicamente ben dotata, come dettaglieremo nel seguito, e nonostante ciò la sola ventilazione naturale non sia sufficiente per ottenere il ricambio d'aria desiderato pari a 6 ricambi per ora (per l'importanza di questo indicatore e per una sua stima si veda l'Appendice A). Nell'esempio dell'infografica l'aula presenta soffitti alti e ampie finestre con aperture su più livelli. I soffitti alti forniscono maggiore volume a parità di superficie, le finestre a più livelli permettono l'apertura selettiva che evita le correnti d'aria dirette sulle persone e consente tendaggi per evitare eventuale abbagliamento sui livelli inferiori ad altezza banco. Nonostante queste caratteristiche non certo comuni nell'edilizia scolastica, la ventilazione naturale in questa simulazione garantisce solo quattro ricambi d'aria per ora. Questi risultati non sorprendono perché la ventilazione naturale

richiede edifici non solo con soffitti alti e ampie finestre e aperture su più livelli, ma anche la presenza di camini di ventilazione che siano efficaci nelle diverse stagioni. Tutte queste caratteristiche, e soprattutto la mancanza di camini di ventilazione per esempio attraverso ampi vani scala, e la mancanza di possibilità di flussi d'aria trasversali all'edificio, rende inefficace nell'architettura scolastica prevalente il ricorso alla sola ventilazione naturale. I risultati di un monitoraggio della qualità dell'aria in licei della provincia di Roma che fanno ricorso esclusivo alla ventilazione naturale ha confermato queste criticità [Agorà et al., 2020]. Lo studio di Stabile et al. [2021] utilizza il modello di valutazione del rischio contagio COVID-19 di Buonanno et al. [2020] applicato al caso di un'aula scolastica sotto diverse ipotesi di ventilazione (naturale e meccanica), di misure di mitigazione (livello della ventilazione, mascherine), e di sorgente del contagio (insegnante o studente). Questo studio mostra come il ricorso alla ventilazione naturale non sia affidabile se le aperture delle finestre sono decise in base a schedulazioni a priori. Anche la regola d'azione dell'Istituto Federale per la Sicurezza e la Salute sul Lavoro della Germania, BAuA [2020] (aprire le finestre 5 minuti ogni 20 minuti), può in alcuni scenari risultare insufficiente. Questo deriva dall'elevata variabilità dei ricambi d'aria per ventilazione naturale. Stabile et al. [2021] stimano una variabilità di questo parametro pari ad un ordine di grandezza.

A questi limiti della ventilazione naturale vanno aggiunti i disagi che possono derivare dall'ambiente circostante l'edificio (come i rumori, l'inquinamento, gli allergeni), i vincoli sulla sicurezza per l'apertura di porte e finestre, e l'elevato consumo energetico nelle stagioni di uso degli impianti di riscaldamento e raffrescamento (questi ultimi raramente disponibili nelle scuole e questa mancanza, associata alle criticità della ventilazione, rende velleitarie le intenzioni di utilizzo a breve termine nel periodo estivo delle strutture scolastiche). Va però sottolineato che oggi grazie alla sensoristica a basso costo, i rilevatori di concentrazione di CO<sub>2</sub>, possiamo integrare al meglio la ventilazione naturale disponibile.

## 5. Interventi di breve e medio periodo

Un intervento organico sulla qualità dell'aria nelle scuole dovrebbe basarsi su quello che è il riferimento dello stato della tecnica, ovvero gli impianti di ventilazione meccanica controllata, Sezione 5.1. Purtroppo, un tale intervento su tutte le scuole italiane avrebbe tempi non conciliabili con l'emergenza pandemica, quindi l'esigenza di misure di breve periodo descritte nelle Sezioni 5.2 e 5.3. Il quadro economico di questi interventi di breve e medio periodo è riportato nella Sezione 5.4.

### 5.1. La ventilazione meccanica controllata

Negli impianti di ventilazione meccanica controllata (VMC) l'aria di ricambio in entrata viene riscaldata (in inverno) o raffrescata (in estate) attraverso uno scambiatore a flussi incrociati che recupera energia rispetto all'aria viziata espulsa. La VMC, pertanto, assicura elevati livelli di ricambio d'aria senza la penalizzazione energetica che la semplice apertura delle finestre comporterebbe. La VMC può anche prevedere stadi di filtrazione, che sono comunque utili per il controllo del particolato in aree urbane inquinate, o per l'abbattimento degli allergeni nelle stagioni che presentano questo rischio. Un ulteriore vantaggio della VMC è costituito da un tasso di ventilazione più costante rispetto a quello altalenante che si registrerebbe con la ventilazione naturale. A parità di valori medi di ventilazione, quella più regolare della VMC è preferibile perché evita la possibilità che ci siano picchi di esposizione in una fase di attenuazione (la chiusura di porte e finestre) della ventilazione naturale [Stabile et al., 2021].

### 5.2. Sensori di CO<sub>2</sub>

Per massimizzare l'utilizzo della ventilazione naturale ci si può avvalere del supporto decisionale dei sensori di CO<sub>2</sub>. Un requisito indispensabile per l'affidabilità delle misure è il ricorso alla tecnologia del sensore di tipo *nondispersive infrared* (NDIR), Fig. 5.1. Un sensore di CO<sub>2</sub>

per ogni classe permetterebbe di decidere le aperture delle finestre sulla base di un criterio oggettivo e stimare, sebbene con approssimazione, il tasso di ricambio d'aria con la procedura riportata nell'Appendice A. La concentrazione di CO<sub>2</sub> è un indicatore prossimale di rischio relativo di contagio via aerosol per gli ambienti interni dove il rischio deriva esclusivamente dalla respirazione [Peng and Jimenez, 2021]<sup>1</sup>. Il rischio relativo è di facile calcolo per differenza rispetto alla concentrazione di CO<sub>2</sub> dell'aria esterna. Per esempio, dato un livello di CO<sub>2</sub> all'esterno di circa 400 parti per milione (ppm), una concentrazione interna di 1200 ppm ( $\Delta = 1200 - 400 = 800$ ) presenta un rischio relativo doppio rispetto ad un valore di 800 ppm ( $\delta = 800 - 400 = 400$ ;  $\Delta = 2 \times \delta$ ). Il concetto di rischio relativo è dirimente perché i contesti, anche in ambito scolastico, possono essere diversi in base al tipo e al modo di utilizzo delle mascherine, e in base all'attività di docenti e alunni, con rischi assoluti maggiori nel caso di attività che implicano elevata inspirazione ed espirazione, ad esempio attività fisica, o canto, come nel caso di un evento di super-diffusione nel coro di Skagit Valley, US, analizzato in Miller et al. [2020]. La Fig. 5.2 contiene un approfondimento sulla definizione di rischio relativo.

La concentrazione di CO<sub>2</sub> può essere utilizzata anche per una stima della percentuale di aria inspirata che è stata già espirata, un esempio è riportato nella tabella di Fig. 5.3, colonna "*% rebreathed air*", e la soglia critica può essere adattata in base alla presenza o assenza di filtrazione dell'aria ambiente con una codifica "a semaforo" di facile visualizzazione. Una infografica sul rischio nei locali interni in termini di aria re-inalata stimata in base alla concentrazione di CO<sub>2</sub> e basata sulle linee guida di Allen et al. [2020], Minguillón et al. [2020] è riportata in Fig. 5.4. Esempi di misure di qualità dell'aria in continuo in un'aula scolastica con un sensore di CO<sub>2</sub> sono presentati nelle Figure 5.5 e 5.6. Un esempio di attivismo civico basato su sensori e dati aperti è descritto nell'Appendice B.

### 5.3. Purificatori portatili HEPA

Come soluzione di breve periodo di integrazione alla ventilazione naturale una tecnologia commercialmente disponibile è quella dei purificatori portatili basati su filtri HEPA (*High Efficiency Particulate Air*). Lo studio di Curtius et al. [2021] valida questa tecnologia nelle aule scolastiche, mentre gli studi discussi nell'Appendice C criticano il ricorso ad altre tecnologie che non hanno riscontri scientifici adeguati. Il dimensionamento di tali purificatori dovrebbe innanzitutto

---

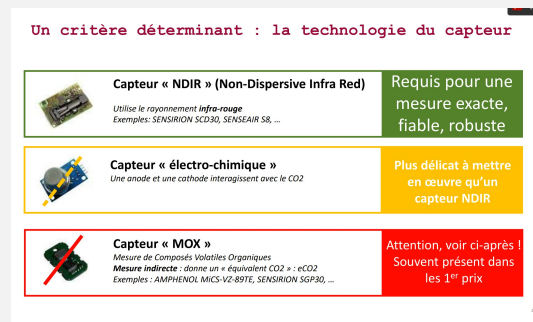
<sup>1</sup>Per locali come i bagni, la concentrazione di CO<sub>2</sub> non è da sola un indicatore affidabile di rischio.

Figura 5.1.: Confronto tra tecnologie dei sensori CO<sub>2</sub>

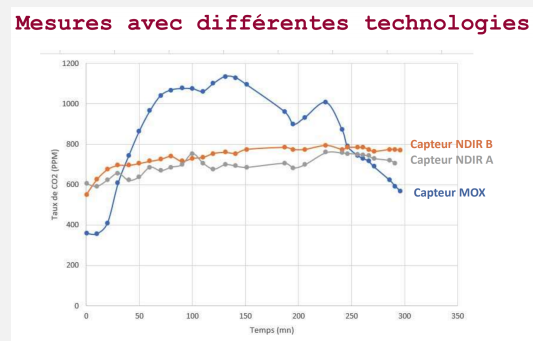
Grafici (a) e (b) sulla destra dalla presentazione di Morenton [2021a].

Nel grafico (a) le caratteristiche principali dei tre tipi di sensori più comuni: NDIR, elettrochimico, e MOX.

Di queste tre tecnologie quella meno costosa è quella di tipo MOX. Ma, grafico (b) di confronto tra NDIR e MOX, quest'ultima risulta essere la tecnologia meno affidabile. Il sensore MOX non misura direttamente la CO<sub>2</sub> ma la stima indirettamente dalla misura dei composti organici volatili. Il sensore di tipo MOX per la stima della CO<sub>2</sub> può essere confuso da odori ambientali.



(a)



(b)

definire la combinazione tra i ricambi d'aria possibili con la ventilazione naturale, e quelli, per differenza rispetto all'obiettivo, che devono essere assegnati a questa tecnologia. Per un approfondimento rimandiamo alle linee guida elaborate nell'ambito di un progetto europeo [Minguillón et al., 2020]. Per un calcolo di massima ed esemplificativo, ipotizzando un'aula di 180 metri cubi, e un obiettivo di 5 ricambi d'aria per ora da assicurare con i purificatori, risulta necessaria una erogazione di aria filtrata di 900 m<sup>3</sup>/h. Questa caratteristica di un purificatore HEPA è comunemente riportata con l'acronimo inglese CADR (*Clean Air Delivery Rate*, il tasso di erogazione di aria pulita).

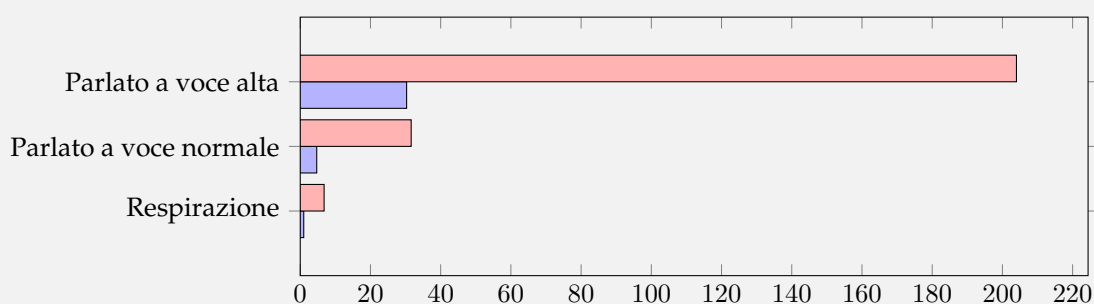
## 5.4. Quadro economico degli interventi

I sensori di CO<sub>2</sub> possono essere auto-costruiti dagli studenti come attività di laboratorio, con una spesa nell'intervallo tra i 30 e i 70€ per sensore. Su questi progetti *open source* segnaliamo il sito del Prof. P. Morenton (Université Paris-Saclay), [Morenton, 2021c], che rende disponibili

schemi come quello di Fig. 5.7. Sensori commerciali hanno varie caratteristiche (portabilità, connettività, certificazioni, etc) che fanno variare il loro prezzo in un intervallo tra i 100 e i 300€ [Morenton, 2021a]. Una estensiva guida ai sensori commerciali e loro test è mantenuta da Villanueva et al. [2021]. Dotare ogni aula dei 2-4 purificatori HEPA necessari per soddisfare il dimensionamento dell'esempio della Sezione 5.3 costa non più di mille euro. Sulle 370mila aule italiane, considerando anche i locali di servizio e quindi approssimando a 400mila interventi, avremmo un investimento di 400 mln€ per purificatori e 60 mln€ di sensori CO<sub>2</sub>. Un piano di questo tipo è implementabile in pochi mesi e permetterebbe le riaperture di settembre 2021 con una riduzione significativa del rischio covid, oltre che con notevoli co-benefici in termini di salubrità delle aule. Resterebbe comunque da programmare su più anni la completa ristrutturazione energetica delle scuole dove la VMC giocherebbe invece, ma con maggiori investimenti di non meno di due miliardi di euro, un ruolo decisivo. La sensoristica acquistata per l'emergenza pandemica continuerebbe ad essere utile per l'esercizio ottimale delle VMC, mentre i purificatori portatili potrebbero essere destinati ad altri luoghi pubblici con minore tasso di occupazione, per esempio gli uffici, e così continuare ad essere utili per la loro intera vita tecnica. Il costo di manutenzione annuale dei purificatori portatili, per pulizia e sostituzione filtri, è pari a circa il 20–30% del loro valore d'acquisto, mentre per gli impianti VMC questa spesa annuale è inferiore al 5% del valore di progetto. La sintesi di questo quadro economico è riportata nella Tab. 5.1

Figura 5.2.: CO<sub>2</sub> come indicatore prossimale di rischio relativo vs assoluto

L'emissione di CO<sub>2</sub> in un ambiente interno dipende dall'attività metabolica degli occupanti. Normalizzando rispetto allo stato di assoluto riposo, un'attività leggera come il camminare comporta circa un raddoppio dell'emissione di CO<sub>2</sub> a riposo, e un'attività ginnica moderata una moltiplicazione per quattro del valore basale. Fattori maggiori sono possibili per sforzi fisici più intensi, ma questi non vengono sostenuti per tempi lunghi, se non da atleti. L'emissione virale da cui dipende il rischio contagio, invece, varia in intervalli molto più ampi di quelli dell'attività metabolica, e con una ulteriore dipendenza dal tipo di emissione sonora. L'emissione virale è misurata in *quanta*, dove un *quantum* è la dose di aerosol che causa un contagio nel 63% dei contatti suscettibili. A titolo di esempio nel grafico seguente sono riportati degli intervalli di variazione del tasso normalizzato di emissione di quanta. A queste differenze negli intervalli di variazione della CO<sub>2</sub> e dei quanta vanno aggiunte le altre condizioni che ulteriormente modulano il rischio contagio come l'adozione di dispositivi di protezione individuali che sono indipendenti dall'attività metabolica e l'adozione di dispositivi di filtrazione dell'aria che non influenzano il tasso di CO<sub>2</sub>. Per questi motivi la CO<sub>2</sub> è un indicatore prossimale di rischio relativo e non assoluto. A parità di concentrazione di CO<sub>2</sub> un locale come una mensa dove non si indossano le mascherine e i commensali parlano in maggioranza e anche a voce alta presenta un rischio molto maggiore di un auditorium dove il pubblico ascolta in silenzio e indossa la mascherina mentre un oratore parla a voce normale amplificata e diffusa da altoparlanti.



Tasso di emissione relativo di quanta per tre tipi di attività (semplice respirazione, parlato a voce normale, e parlato a voce alta) in condizione di riposo (in blu) e durante intenso sforzo fisico (in rosso). La normalizzazione è effettuata rispetto al tasso di emissione a riposo con semplice respirazione. Fonte dei dati Peng et al. [2021].



Figura 5.3.: Soglie CO<sub>2</sub> consigliate dal Prof. J. L. Jemenez in assenza e presenza di filtri HEPA

**CO<sub>2</sub> LIMIT AS AN INDIRECT INDICATOR OF THE RISK OF INFECTION**

The risk of infection (aerosols) is proportional to the CO<sub>2</sub> concentration:

- It is calculated as the **difference** between the CO<sub>2</sub> found **indoors** and **outdoors** ( $\Delta\text{CO}_2$ ).
- If  $\Delta\text{CO}_2 > 0$ , **risk** already exists.

CO <sub>2</sub> LEVEL (CO <sub>2,atm</sub> = 420 ppm)	$\Delta\text{CO}_2$ indoors-outdoors	% rebreathed air	If a HEPA filter is operating	
≥ 1000 ppm	600 ppm	1,47%	limit	WHO limit
≥ 900 ppm	500 ppm	1,21%	warning	RITE limit (IDA 2)
≥ 800 ppm	400 ppm	0,96%	acceptable	-
≥ 700 ppm	300 ppm	0,71%	suitable	-
< 700 ppm	300 ppm	0,71%	suitable	Harvard/IDAEA-CSIC-LIFTEC Guides
< 550 ppm	150 ppm	0,33%	suitable	Corridors and common areas

@MA\_Campano

Per una stima della percentuale di aria re-inalata si effettua il seguente calcolo. Data una differenza di ~40 000 ppm tra la concentrazione di CO<sub>2</sub> dell'aria espirata e di quella di fondo, dove il simbolo "~" indica un'approssimazione, ogni ~400 ppm aggiuntivi al valore di fondo, che è pari a ~400 ppm (in condizioni non dominate da inquinamento da combustione), equivale ad un aumento di un punto percentuale di aria re-inalata. Così a ~800 ppm l'aria re-inalata è pari all'~1% di quella inspirata, a ~1200 ppm questa stima è del ~2%, etc.

Figura 5.4.: Definizione di rischio per locali interni in termini di aria re-inalata stimata in base alla concentrazione di CO<sub>2</sub>, linee guida Harvard, Allen et al. [2020], e IDAEA-CSIC-LIFTEC, Minguillón et al. [2020], infografica di El Pais [2021]

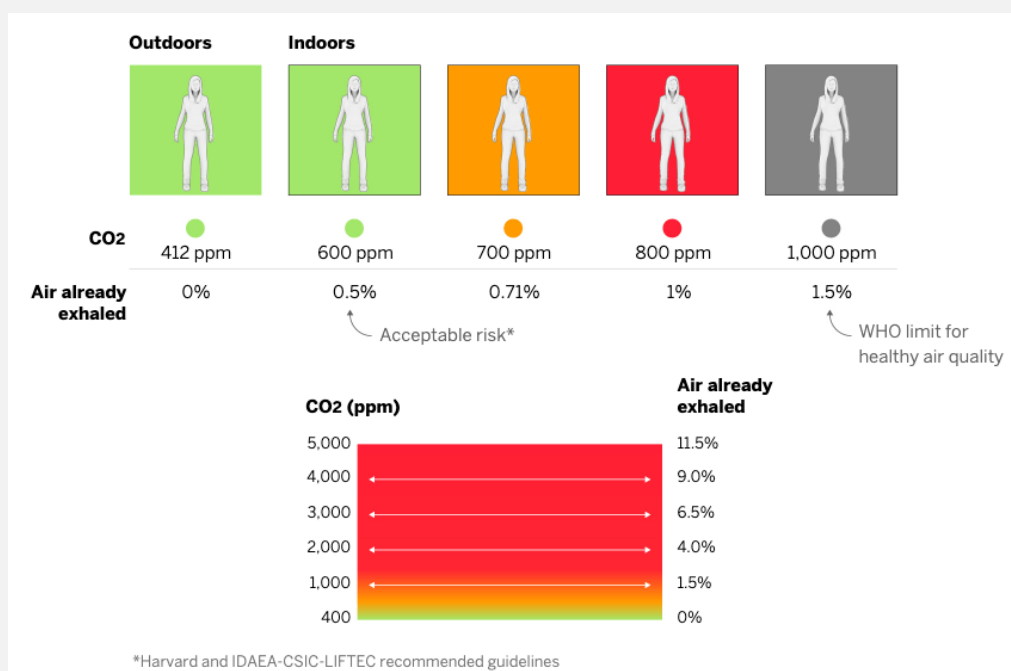
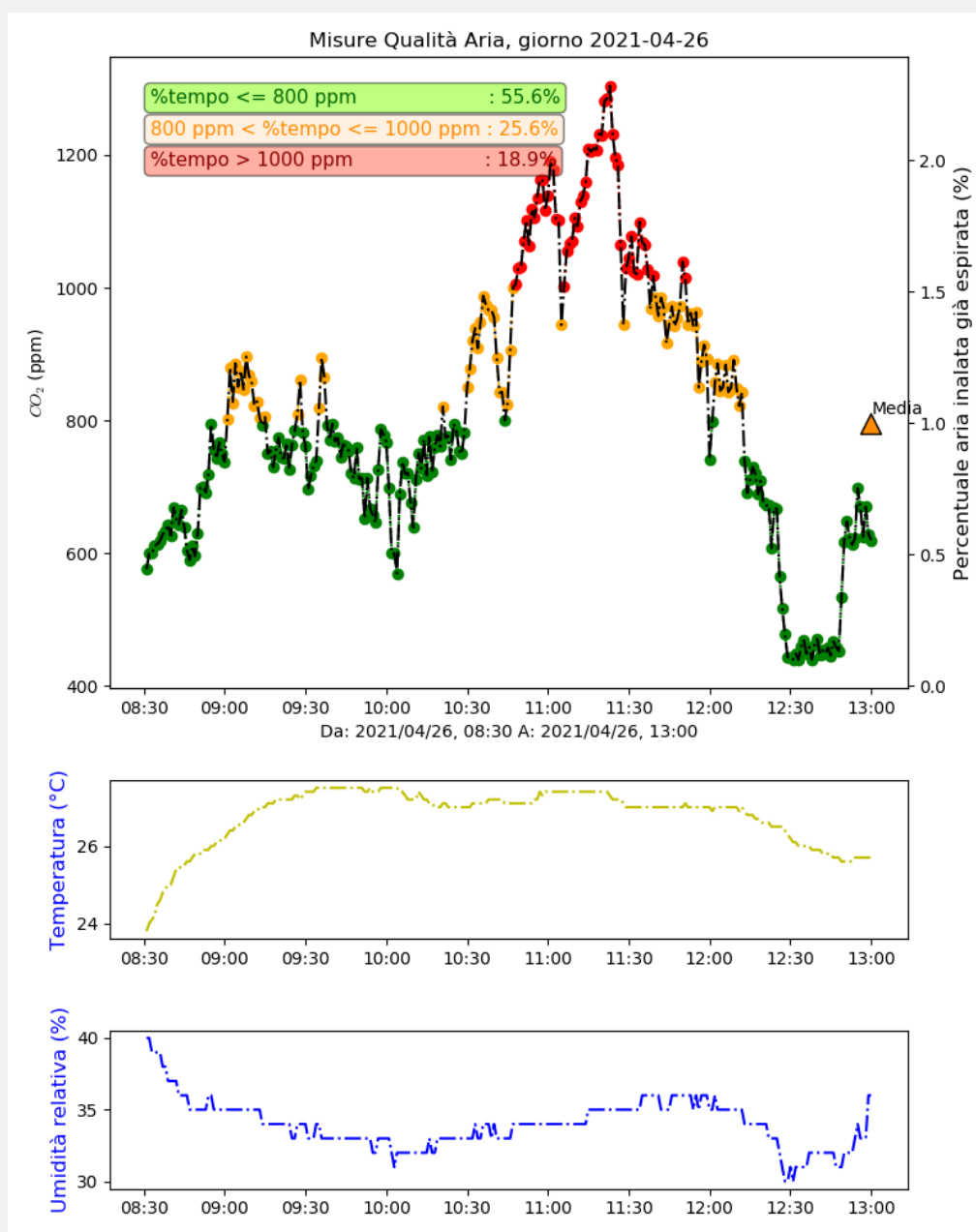


Figura 5.5.: Esempio di misure di qualità dell'aria in continuo in un'aula scolastica

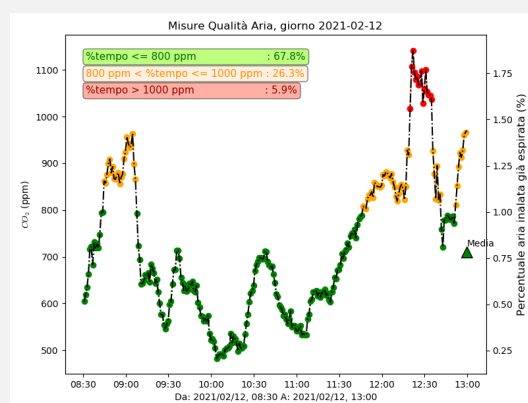


Età degli alunni 12 anni, classe di 22 alunni più un insegnante, ventilazione naturale in giornata soleggiata di primavera, zona climatica C, ma nonostante questi fattori facilitanti, si registra un periodo di misure critiche indicate in rosso. Il grafico della CO<sub>2</sub> riporta sull'asse delle ordinate destro la percentuale di aria re-inalata, il cui valore medio è indicato dal triangolo, in questo caso di colore arancione in base alla classificazione scelta e riportata in alto a sinistra con la suddivisione del tempo nelle tre classi di rischio. Un sensore di CO<sub>2</sub> tipicamente è integrato con un termo-igrometro, ed è pertanto così possibile confrontare l'andamento della CO<sub>2</sub> con queste altre misure di comfort (i due pannelli in basso nel grafico) al fine di individuare in modo puntuale le opportunità e i limiti della ventilazione naturale.

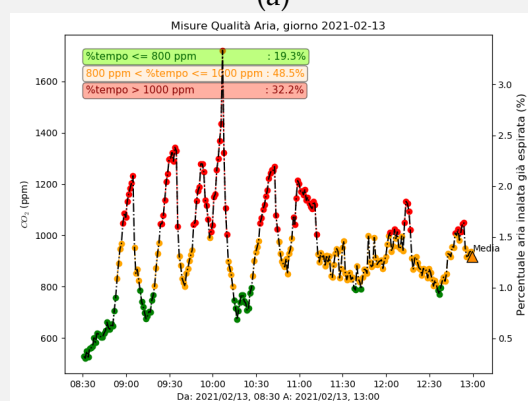
Figura 5.6.: Altre misure di CO<sub>2</sub> in varie giornate scolastiche

Sulla destra quattro giornate scolastiche di misure di CO<sub>2</sub> nella stessa aula descritta nella didascalia della Fig. 5.5.

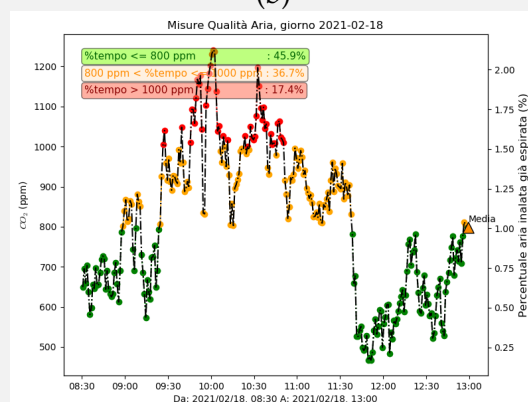
I grafici (a)–(c) sono relativi a tre giorni del mese di febbraio, e il grafico (d) ad un giorno del mese di marzo inoltrato. Il giorno delle misure in (a) era caratterizzato da una temperatura mite che ha consentito una quasi costante apertura delle finestre. Questa giornata dal clima mite è stata seguita, misure in (b), da una brusca discesa delle temperature che ha indotto a delle aperture molto meno frequenti delle finestre. Il giorno delle misure in (c) è stato molto soleggiato con una temperatura esterna che ha sì consentito le aperture delle finestre, ma nell'aula esposta ad Est il sole diretto ha indotto ad attivare le tende che hanno così causato una riduzione del flusso dell'aria esterna. Ne è conseguito un peggioramento della qualità dell'aria nella prima parte della mattina. Le misure in (d) mostrano che anche ad inizio primavera, in una zona climatica mite, si possono verificare delle condizioni meteo che inducono ad aprire poco le finestre e pertanto a subire una non buona qualità dell'aria interna.



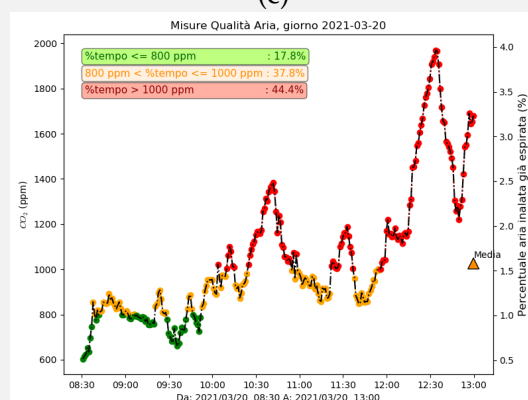
(a)



(b)



(c)

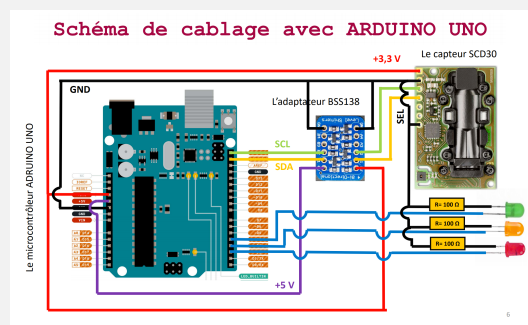


(d)

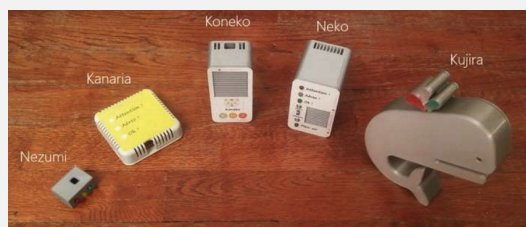
Figura 5.7.: Auto-costruzione di sensori di CO<sub>2</sub>

La guida di Morenton [2021b] fornisce schemi di cablaggio, liste della componentistica, e codici di controllo per l'autocostruzione di sensori di CO<sub>2</sub>. Nell'immagine (a) uno schema di cablaggio con micro-controllore Arduino.

L'auto-costruzione permette di sperimentare con fattori di forma e caratteristiche diverse, dalle versioni più minimaliste a quelle con più funzionalità (b).



(a)



(b)

Tabella 5.1.: Quadro economico degli interventi di breve e medio periodo

Interventi di breve periodo, anno 2021

Tecnologia	Investimento (mln€)	Spesa annua di manutenzione, anno successivo al completamento dell'intervento (mln€/anno)
Sensori CO <sub>2</sub>	60	0
Purificatori portatili HEPA	400	100

Intervento di medio periodo, quinquennio 2021-2025

Ventilazione meccanica controllata	2000	100
------------------------------------	------	-----

## 6. Co-benefici della ventilazione nelle scuole

**A**umentare significativamente il ricambio d'aria nelle aule scolastiche non è soltanto una necessità per la riduzione del rischio contagio in questa pandemia, ma presenta un ampio quadro di co-benefici [Houghton, 2020, Corsi et al., 2021]. Per gli studenti e il personale della scuola sussistono motivazioni generali di salute pubblica già descritti in rapporti del Ministero della Salute, ad esempio ["GRUPPO GARD-I", 2011]. Nello specifico per gli studenti è nota in letteratura una relazione causa-effetto tra ricambi d'aria e apprendimento [Haverinen-Shaughnessy et al., 2011] e altri studi citati in Tab. 6.1. Per una sintesi divulgativa di questo nesso ventilazione-cognizione si veda Grossman [2016]. Inoltre, recentemente è stato osservato questo ulteriore fenomeno: l'emissione di CO<sub>2</sub> degli occupanti di un locale aumenta con il loro stress cognitivo [Gall et al., 2021]; potremmo dire, il circolo vizioso dell'aria viziata!

Sottolineiamo anche il vantaggio per l'economia nazionale dello sviluppo di una filiera di progettazione, produzione e installazione di impianti VMC, imprescindibili per il raggiungimento degli obiettivi di efficienza energetica negli usi civili che la strategia di decarbonizzazione al 2050 ha indicato [MATTM, 2021]. Da considerare anche le ricadute sulla didattica (Fig. 6.1) ed in particolare sull'educazione ambientale affinché le nuove generazioni non compiano gli errori del passato, particolarmente in Italia, il paese dell'Europa occidentale i cui cittadini subiscono una delle peggiori qualità dell'aria [EEA, 2020], fattore che potrebbe aver contribuito al pesante bilancio di questa pandemia [Rohrer et al., 2020, Wu et al., 2020].

Gli interventi presentati si conciliano con approcci alla ri-progettazione degli edifici e degli spazi urbani come quello del "Nuovo Bauhaus" di Bason et al. [2020]. Ricordiamo che tra le motivazioni del primo Bauhaus di un secolo fa avevano un ruolo importante le esigenze di ventilazione per mitigare le epidemie di malattie infettive per via aerea di quel tempo [Campbell, 2005] e Fig. 6.2.

**Tabella 6.1.: Vantaggi aggiuntivi di una maggiore ventilazione e di una migliore qualità dell'aria nelle scuole oltre a quelli della mitigazione delle malattie infettive trasmesse per via aerea (traduzione della Tab. 1 in Corsi et al. [2021])**

Effetto della ventilazione	Contesto dello studio	Risultati	Riferimento bibliografico
↑ Test scolastici	I lavori di ristrutturazione per la ventilazione sono stati completati per migliorare la qualità dell'aria in tutti gli edifici scolastici di un distretto scolastico del Texas.	I risultati di test di matematica e lettura sono notevolmente migliorati, con una maggiore probabilità di passare i test del 2% e 3%, rispettivamente.	Stafford [2015]
↑ Funzioni cognitive	Le concentrazioni di CO <sub>2</sub> sono state utilizzate come indicatori prossimali dei tassi di ventilazione nelle aule.	Test cognitivi degli studenti mostrano una diminuzione del 5% della capacità di attenzione in aule scarsamente ventilate. I ricercatori equiparano questo effetto a quello di uno studente che salta la colazione.	Coley et al. [2007]
↑ Risultati in Matematica, Lettura e Scienze	Tassi di ventilazione delle aule sono stati misurati in 140 aule del quinto anno ( <i>fifth grade</i> ) negli USA.	La media dei voti dei test di Matematica ha avuto un incremento fino allo 0,5% per ogni litro al secondo per persona in più di ventilazione, con effetti simili nei voti dei test di Lettura e Scienze.	Haverinen-Shaughnessy and Shaughnessy [2015]
↓ Sintomi dell'asma	Sono stati misurati i fattori di esposizione in 100 aule scolastiche fra primaria e secondaria con e senza nuovi sistemi di ventilazione.	Gli alunni che hanno frequentato scuole con nuovi sistemi di ventilazione hanno riportato un numero inferiore di sintomi legati all'asma.	Smedje and Norbäck [2000]
↓ Sintomi respiratori	Oltre 4.000 alunni del sesto anno di 297 scuole hanno partecipato ad uno studio della qualità dell'ambiente interno delle scuole.	Tassi di ventilazione più bassi, condensazione, ed elevata umidità sono stati fattori che in maniera indipendente sono stati associati a una maggiore incidenza di sintomi respiratori. Un livello di ventilazione inadeguato è stato anche associato a più giorni di assenza a scuola.	Toyinbo et al. [2016]
↓ Giorni di scuola persi	L'aumento dei tassi di ventilazione e i giorni di assenza dei bambini per malattia sono stati studiati su 635 bambini che frequentano 20 asili nido in Danimarca.	È stata riscontrata una diminuzione del 12% dei giorni di malattia per un aumento unitario del tasso orario di ricambio d'aria.	Kolarik et al. [2016]
↓ Assenze dei bambini	La CO <sub>2</sub> come indicatore prossimale per la ventilazione è stata misurata in 60 classi di scuola primaria con ventilazione naturale in Scozia.	Per ogni aumento di 100 ppm di concentrazione media di CO <sub>2</sub> le presenze per studente sono diminuite di circa 0,4 giorni all'anno.	Gaihire et al. [2014]
↓ Assenze per malattia	La concentrazione di CO <sub>2</sub> è stata misurata con continuità per due anni in 162 classi di scuola primaria statunitensi con un mix di ventilazione meccanica e naturale.	Per ogni litro al secondo e per persona in più di ventilazione, le assenze per malattia sono diminuite dell'1,6%.	Mendell et al. [2013]



Figura 6.1.: Misure di CO<sub>2</sub> e didattica

L'argomento anidride carbonica si presta a molteplici approfondimenti didattici, per ogni livello scolastico.

Per gli alunni del primo ciclo un sensore di CO<sub>2</sub> può essere l'occasione per praticare la visualizzazione dei dati, immagine (a) da un'esperienza didattica in Francia.

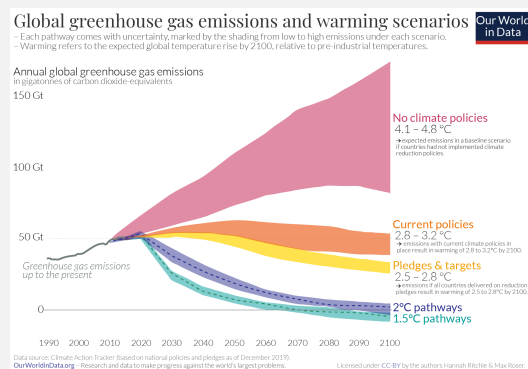
Ad un livello più avanzato, il nesso concentrazione di CO<sub>2</sub> in atmosfera, attività antropiche e cambiamento climatico. Nell'immagine (b) lo stato dell'arte sugli scenari climatici per fine secolo.

Fonte delle immagini:

- (a) <https://twitter.com/NumeriKinsttit/status/1356651512894808064>.
- (b) Ritchie and Roser [2020].



(a)



(b)

Figura 6.2.: Bauhaus



Finestre, Bauhaus in Dessau, Germania. Foto di Harald Selke, licenza creative commons, <https://www.flickr.com/photos/tewahipounamu/2096238776>

## A. Stima del tasso di ricambio d'aria con un sensore di CO<sub>2</sub>

Un sensore di CO<sub>2</sub> può essere utilizzato per il calcolo approssimato del tasso di ricambio d'aria di un locale interno. Il numero di ricambi d'aria per ora (in inglese *air changes per hour*, ACH) è uno degli indici di prestazione più utilizzati nell'ambito della ventilazione, ma induce spesso dei fraintendimenti. Un valore di ACH pari ad uno *non* indica che l'aria interna ad un locale venga completamente rinnovata nel corso di un'ora. L'aria interna che viene rimpiazzata dall'aria esterna con ACH pari ad uno è circa il 63%. Così, con ACH=1, dopo due ore l'aria interna rimpiazzata è l'86% di quella iniziale, e solo dopo tre ore l'aria interna rimpiazzata è il 95% di quella iniziale. Affinché in un'ora il 97% dell'aria interna sia rimpiazzata da aria esterna il tasso di ricambio d'aria deve essere pari a sei.

Stimare con precisione il valore di ACH richiede apparecchiature specialistiche non alla portata dei comuni cittadini, ma un sensore di CO<sub>2</sub> può ben approssimare tale misura con la procedura descritta in Allen et al. [2020] e adattata in Fig. A.1 al caso di non disponibilità di una fonte emissiva di CO<sub>2</sub> (ghiaccio secco nell'esempio di Allen et al. [2020]).

Questa stima andrebbe ripetuta in diverse condizioni ambientali, perché l'ACH cambia con le condizioni meteorologiche, in particolare la ventosità, e con le condizioni d'uso degli edifici, es. apertura di finestre in altri vani che può modificare le infiltrazioni d'aria nel locale oggetto di misure.

### Figura A.1.: Procedura per la stima del tasso di ricambio d'aria, ACH

1. Calibrare il sensore di CO<sub>2</sub> e configurarlo in modo che le misure avvengano e siano registrate almeno ogni minuto.
2. Misurare la concentrazione di CO<sub>2</sub> dell'aria esterna, nel seguito indicata come  $C_0$ . In località non eccessivamente inquinate da fenomeni di combustione il valore di fondo della CO<sub>2</sub> è pari a circa 400 ppm. In località inquinate  $C_0$  può essere nell'intervallo 500–600 ppm.
3. Porre il sensore di CO<sub>2</sub> all'interno del locale di cui si vuole stimare l'ACH. In tale locale deve registrarsi un valore di CO<sub>2</sub> di almeno 2000 ppm, facilmente raggiungibile in locali anche moderatamente affollati senza impianti di ventilazione<sup>a</sup>.
4. Al raggiungimento del livello di CO<sub>2</sub> di circa 2000 ppm tutte le persone lasciano il locale. Il sensore continua le misurazioni.  $C_{inizio}$  è la concentrazione di CO<sub>2</sub> a questo istante temporale.
5. Attendere che la concentrazione di CO<sub>2</sub> decada ad un valore del 37% del picco rispetto al valore di fondo. Esempio: se il valore di fondo  $C_0$  è di 400 ppm, e se il valore registrato all'interno all'inizio dell'esperimento,  $C_{inizio}$ , è di 2000 ppm, il picco rispetto al valore di fondo è di 1600 ppm, e quindi il 37% di questo valore, 592 ppm, aggiunto al valore di fondo, 400 ppm, fornisce il valore finale:  $C_{fine} = C_0 + 0,37 \times (C_{inizio} - C_0) = 400 + 0,37 \times 1600 = 992$  ppm.
6. Calcolare il tempo espresso in ore intercorso tra la concentrazione iniziale e quella finale. Detto  $\Delta_t$  tale valore, se per esempio il tempo trascorso tra la misura  $C_{inizio}$  e  $C_{fine}$  è di 20 minuti, allora  $\Delta_t = 20/60 = 0,33$  ore.
7. Se si è seguita questa procedura, l'inverso di  $\Delta_t$  fornisce approssimativamente ACH, che nell'esempio precedente è quindi pari a tre.

Nei casi in cui non si riesca a monitorare il decadimento richiesto, si può utilizzare la seguente formula generale con i valori  $C_{inizio}$ ,  $C_{fine}$  e il loro intertempo  $\Delta_t$ :

$$ACH = -\frac{\ln\left(\frac{C_{fine} - C_0}{C_{inizio} - C_0}\right)}{\Delta_t}. \quad (A.1)$$

Come si può osservare, se  $C_{fine}$  corrisponde al decadimento richiesto del 37% del picco rispetto al valore di fondo, allora la formula A.1 si semplifica in

$$ACH = -\frac{\ln 0,37}{\Delta_t} \approx \frac{1}{\Delta_t},$$

come indicato al punto 7.

<sup>a</sup>in pandemia assicurarsi di condividere tali condizioni di aria interna solo con contatti in "bolla".

## B. Sensori di CO<sub>2</sub>, dati aperti e attivismo civico

Un esempio di attivismo civico basato su dati aperti e sensori di CO<sub>2</sub> è fornito dal sito web Drouin [2021]. Il sito è stato creato da Olivier Drouin, un padre di due alunne che, preoccupato per il lassismo delle istituzioni del Quebec sul rischio aerosol, ha divulgato sulla CO<sub>2</sub> come indicatore di rischio e ha stimolato la raccolta di dati da parte della cittadinanza sul contagio COVID-19 e sulla ventilazione nelle scuole in quella provincia del Canada. I dati raccolti sono relativi ad un migliaio di scuole, 60 delle quali dotate di sistemi di purificazione dell'aria o di sistemi di ventilazione. La raccolta dei dati sulla ventilazione ha evidenziato che a Montreal le scuole con dispositivi per migliorare la qualità dell'aria sono quelle dove studiano i figli delle famiglie benestanti (le pubbliche dei quartieri anglofoni e le private francofone). Le scuole pubbliche degli altri quartieri, a maggioranza francofona, e meno avvantaggiate in termini di status socio-economico, invece non hanno di questi sistemi, e le misure di qualità dell'aria mostrano valori preoccupanti. In circa metà delle scuole del Quebec il valore soglia di 1000 ppm di CO<sub>2</sub> è ampiamente superato. Le scuole dove sono stati installati i sistemi per la qualità dell'aria hanno avuto il budget disponibile grazie alle donazioni delle famiglie degli studenti. Le altre scuole dei quartieri meno avvantaggiate non avendo simili donazioni si sono viste rifiutare i fondi per i purificatori da parte del governo provinciale che ha adottato la linea di sottovalutazione del rischio aerosol. I dati raccolti da Drouin indicano che l'incidenza dei contagi è da tre a quattro volte maggiore nelle scuole sprovviste di dispositivi per la qualità dell'aria.

Questa esperienza è stata ripresa da vari media, ad esempio Ross [2021]. La correlazione trovata da Drouin soffre di un possibile *bias*, perché sappiamo che anche lo status socio-economico influisce sulle incidenze di contagio. Quindi l'effetto dei sistemi per la qualità dell'aria potrebbe essere minore rispetto a quello registrato da questi dati. L'attivismo civico basato sui dati

non può includere tutti gli strumenti statistici che sono lo standard in questo tipo di analisi. Ma il segnale nei dati (fattore 3–4) è notevole, e ha il merito di sollevare all'attenzione dell'opinione pubblica un'altra plausibile disparità in questa pandemia. Drouin è stato insignito del premio *Data Hero*, Fig. B.1.

Figura B.1.: *Data Hero*



L'annuncio su Twitter del premio conferito a Olivier Drouin per l'iniziativa dati aperti su COVID-19 e ventilazione nelle scuole: <https://twitter.com/CovidEcoles/status/1385348912299614209>.

## C. Tecnologie di purificazione dell'aria *non validate* per un uso nelle scuole

I massimi esperti internazionali di qualità dell'aria indoor e aerosol sono univoci nello sconsigliare tecnologie di purificazione non consolidate. La lettera aperta di Zaatari and Harmon [2021], sottoscritta da dodici ricercatori, tra cui i professori Jose Luis Jimenez (University of Colorado) e Richard Corsi (University of Texas), elenca la letteratura critica nei confronti di queste tecnologie che, nonostante le dichiarazioni dei produttori, nelle condizioni reali di utilizzo falliscono nel conseguire gli obiettivi dichiarati. Inoltre, possono persino causare effetti indesiderati in termini di aumento dell'inquinamento dell'aria interna degli edifici, per esempio attraverso generazione di ozono e contaminanti da esso derivanti. Queste indicazioni sul rischio ozono sono coerenti con le linee guida elaborate dall'agenzia statunitense di protezione ambientale sugli impianti per la filtrazione dell'aria nell'edilizia residenziale [EPA, 2018]. Il comitato sulla sicurezza negli edifici della commissione COVID-19 di *The Lancet* nel rapporto [Corsi et al., 2021] elenca tra i sistemi di purificazione **non validati** da evidenze scientifiche per un utilizzo nelle scuole quelli basati su: ionizzazione bipolare, plasma, purificatori portatili con ionizzatori o irraggiamento a ultravioletti (UV), perossido di idrogeno secco, e ossidazione fotocatalitica. I sistemi di purificazione con irraggiamento UV a soffitto o nei condotti possono essere considerati sistemi efficaci e sicuri se installati da professionisti certificati. Per semplicità d'installazione e manutenzione la filtrazione certificata HEPA è da preferire.



Figura C.1.: Le indicazioni del comitato sulla sicurezza negli edifici della commissione COVID-19 di *The Lancet*, Aprile 2021

Estratto da Corsi et al. [2021], rapporto di Aprile 2021 del comitato sulla sicurezza negli edifici della commissione COVID-19 di *The Lancet* relativo alle scuole. Notare, oltre alla lista delle tecnologie di purificazione non consigliate, anche il richiamo ad evitare eccessi di pulizia delle superfici. La cosiddetta "sanificazione" è stata una delle ossessioni di questa pandemia. Ossessione che adesso viene riconosciuta nel migliore dei casi come inutile, e nel peggiore dannosa per i rischi alla salute e, soprattutto, per il costo-opportunità: le risorse economico-organizzative sprecate che avrebbero potuto essere dirette alla qualità dell'aria.

Other strategies that have recently been implemented or considered in many schools (such as bipolar ionization, plasma systems, portable air cleaning units with ionizers or UV, dry hydrogen peroxide, photocatalytic oxidation) are generally considered less scientifically defensible due to their often unproven efficacies and due to their potential for degrading the quality of the air through the generation of harmful secondary pollutants.<sup>51-54</sup> Untargeted and excessive deep surface cleaning efforts (e.g., using foggers or electrostatic sprayers) should not be employed for the same reasons.<sup>55</sup> Instead, schools should focus their resources on reducing the risk of SARS-CoV-2 airborne transmission.

# Bibliografia

Agorà et al. Il cambiamento è nell'aria. Technical report, Agorà, Libera Università di Bolzano, Università IUAV di Venezia, Università di Trento, e Università di Padova, 2020. URL [https://www.vogliamoinvertirelarotta.it/wp-content/uploads/2020/06/Report\\_Che-aria-tira-a-scuola.pdf](https://www.vogliamoinvertirelarotta.it/wp-content/uploads/2020/06/Report_Che-aria-tira-a-scuola.pdf).

J. Allen, J. Spengler, E. Jones, and J. Cedeno-Laurent. 5-step guide to checking ventilation rates in classrooms. Technical report, Harvard, 2020. URL <https://schools.forhealth.org/wp-content/uploads/sites/19/2021/01/Harvard-Healthy-Buildings-program-How-to-assess-classroom-ventilation-10-30-2020-R1.8.pdf>.

Allen et al. Building-related risk factors are a critical, but missing, component of SARS-CoV-2 outbreak investigations. Technical report, The Lancet COVID-19 Commission, Task Force on Safe Work, Safe School, and Safe Travel, March 2021. URL <https://static1.squarespace.com/static/5ef3652ab722df11fcb2ba5d/t/604bf19f7da50a5023d24e60/1615589791861/Safe+Work+TF+Building+Outbreaks+March+2021.pdf>.

Christian Bason, Rowan Conway, Dan Hill, and Mariana Mazzucato. A new bauhaus for a green deal. Technical report, November 2020.

BAuA. Lüften am arbeitsplatz in coronazeiten. Technical report, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2020. URL [https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Praxis-kompakt/F93.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=9](https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Praxis-kompakt/F93.pdf?__blob=publicationFile&v=9).

G. Buonanno, L. Morawska, and L. Stabile. Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications. *Environment International*, 145:106112, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106112>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412020320675>.

- Margaret Campbell. What tuberculosis did for modernism: The influence of a curative environment on modernist design and architecture. 49(4):463–488, 2005. doi: DOI: 10.1017/S0025727300009169. URL <https://www.cambridge.org/core/article/what-tuberculosis-did-for-modernism-the-influence-of-a-curative-environment-on> 0A67A6945CA135FCDD7B1D2AB838A990.
- David A Coley, Rupert Greeves, and Brian K Saxby. The effect of low ventilation rates on the cognitive function of a primary school class. *International Journal of Ventilation*, 6(2):107–112, 2007. URL <https://doi.org/10.1080/14733315.2007.11683770>.
- Corsi et al. Designing infectious disease resilience into school buildings through improvements to ventilation and air cleaning. Technical report, The Lancet COVID-19 Commission, Task Force on Safe Work, Safe School, and Safe Travel, April 2021. URL <https://static1.squarespace.com/static/5ef3652ab722df11fcb2ba5d/t/608839f6d2394f40306d1e5d/1619540471284/Safe+Work+TF+Desigining+infectious+disease+resilience+April+2021.pdf>.
- J. Curtius, M. Granzin, and J. Schrod. Testing mobile air purifiers in a school classroom: Reducing the airborne transmission risk for SARS-CoV-2. *Aerosol Science and Technology*, 55(5):586–599, 05 2021. doi: 10.1080/02786826.2021.1877257. URL <https://doi.org/10.1080/02786826.2021.1877257>.
- Olivier Drouin. Covid ecoles Quebec. Technical report, 2021. URL <https://www.covidecolesquebec.org/>.
- Editorial. Coronavirus is in the air — there’s too much focus on surfaces. *Nature*, 590:7, February 2021. URL <https://www.nature.com/articles/d41586-021-00277-8>.
- EEA. Air quality in europe. Technical report, European Environment Agency, 2020. URL <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report>.
- El Pais. Avoiding coronavirus infection in indoor spaces: don’t breathe other people’s air. Technical report, 2021. URL [https://english.elpais.com/usa/2021-03-29/how-to-avoid-coronavirus-infection-in-indoor-spaces-dont-breathe-other-peoples.html?ssm=TW\\_CC](https://english.elpais.com/usa/2021-03-29/how-to-avoid-coronavirus-infection-in-indoor-spaces-dont-breathe-other-peoples.html?ssm=TW_CC).

- EPA. Portable air cleaners and furnace or hvac filters in the home. Technical report, United States Environmental Protection Agency, 2018. URL [https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-07/documents/guide\\_to\\_air\\_cleaners\\_in\\_the\\_home\\_2nd\\_edition.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-07/documents/guide_to_air_cleaners_in_the_home_2nd_edition.pdf).
- Santosh Gaihre, Sean Semple, Janice Miller, Shona Fielding, and Steve Turner. Classroom carbon dioxide concentration, school attendance, and educational attainment. *Journal of school health*, 84(9):569–574, 2014. URL <https://doi.org/10.1111/josh.12183>.
- Elliott T. Gall, Asit Kumar Mishra, Jiayu Li, Stefano Schiavon, and Aurélie Laguerre. Impact of cognitive tasks on CO<sub>2</sub> and isoprene emissions from humans. *Environmental Science & Technology*, 55(1):139–148, 01 2021. doi: 10.1021/acs.est.0c03850. URL <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03850>.
- Trisha Greenhalgh, Jose L Jimenez, Kimberly A Prather, Zeynep Tufekci, David Fisman, and Robert Schooley. Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2. *The Lancet*, 2021. doi: 10.1016/S0140-6736(21)00869-2. URL [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)00869-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)00869-2).
- Daniel Grossman. Indoor CO<sub>2</sub>: Dumb and dumber? Yale Climate Connections, 2016. URL <https://yaleclimateconnections.org/2016/07/indoor-co2-dumb-and-dumber/>.
- “GRUPPO GARD-I”. La qualità dell’aria nelle scuole e rischi per malattie respiratorie e allergiche – quadro conoscitivo sulla situazione italiana e strategie di prevenzione. Technical report, Ministero della Salute, 2011. URL [http://www.salute.gov.it/imgs/C\\_17\\_pubblicazioni\\_1892\\_allegato.pdf](http://www.salute.gov.it/imgs/C_17_pubblicazioni_1892_allegato.pdf).
- U. Haverinen-Shaughnessy, D. J. Moschandreas, and R. J. Shaughnessy. Association between substandard classroom ventilation rates and students’ academic achievement. *Indoor Air*, 21(2):121–131, 2011. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00686.x>. URL <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00686.x>.
- Ulla Haverinen-Shaughnessy and Richard J. Shaughnessy. Effects of classroom ventilation rate and temperature on students’ test scores. *PLOS ONE*, 10(8):e0136165–, 08 2015. URL <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136165>.

- Adele Houghton. “Co-benefits” as a lens through which COVID-19 building upgrades can advance environmental sustainability, climate mitigation and adaptation, and social equity. *Harvard Public Health Review*, 27, 2020. URL <https://harvardpublichealthreview.org/cobenefits-covid19/>.
- Jacob Janssen and Yaneer Bar-Yam. Lowest-cost virus suppression, 2021. URL <https://arxiv.org/abs/2102.04758>.
- Kaitlyn E Johnson, Madison Stoddard, Ryan P Nolan, Douglas E White, Natasha S Hochberg, and Arijit Chakravarty. In the long shadow of our best intentions: model-based assessment of the consequences of school reopening during the COVID-19 pandemic. *PloS one*, 16(3): e0248509, 2021. URL <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248509>.
- Nicholas R Jones, Zeshan U Qureshi, Robert J Temple, Jessica P J Larwood, Trisha Greenhalgh, and Lydia Bourouiba. Two metres or one: what is the evidence for physical distancing in covid-19? *BMJ*, 370:m3223, 08 2020. doi: 10.1136/bmj.m3223. URL <http://www.bmj.com/content/370/bmj.m3223.abstract>.
- Barbara Kolarik, Z Jovanovic Andersen, T Ibfelt, E Hoj Engelund, E Møller, and E Vaclavik Bräuner. Ventilation in day care centers and sick leave among nursery children. *Indoor air*, 26(2):157–167, 2016. URL <https://doi.org/10.1111/ina.12202>.
- Linsey Marr, Shelly Miller, Kimberly Prather, Charles Haas, William Bahnfleth, Richard Corsi, Julian Tang, Hartmut Herrmann, Krystal Pollitt, Javier Ballester, and Jose-Luis Jimenez. FA-Qs on protecting yourself from COVID-19 aerosol transmission. Technical report, December 2020. URL <https://tinyurl.com/FAQ-aerosols>.
- MATTM. Strategia italiana di lungo termine sulla riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra. Technical report, Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare Ministero dello Sviluppo Economico - Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Ministero delle Politiche agricole, Alimentari e Forestali, Gennaio 2021. URL [https://www.minambiente.it/sites/default/files/lts\\_gennaio\\_2021.pdf](https://www.minambiente.it/sites/default/files/lts_gennaio_2021.pdf).
- Mark J Mendell, Ekaterina A Eliseeva, Molly M Davies, Michael Spears, Agnes Lobscheid, William J Fisk, and Michael G Apte. Association of classroom ventilation with reduced illness absence: a prospective study in california elementary schools. *Indoor air*, 23(6):515–528, 2013. URL <https://doi.org/10.1111/ina.12042>.

- Shelly L Miller, William W Nazaroff, Jose L Jimenez, Atze Boerstra, Giorgio Buonanno, Stephanie J Dancer, Jarek Kurnitski, Linsey C Marr, Lidia Morawska, and Catherine Noakes. Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the skagit valley chorale superspreading event. *Indoor air*, 2020. URL <https://doi.org/10.1111/ina.12751>.
- María Cruz Minguillón, X Querol, M Riediker, JM Felisi, T Garrido, A Alastuey, G Bekö, S Nehr, P Wiesen, and N. Carslaw. Guide for ventilation towards healthy classrooms. COST action ca17136 report, CSIC publications, 2020. URL <https://digital.csic.es/handle/10261/225519>.
- Lidia Morawska and Donald K Milton. It Is Time to Address Airborne Transmission of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19). *Clinical Infectious Diseases*, 71(9):2311–2313, 07 2020. ISSN 1058-4838. doi: 10.1093/cid/ciaa939. URL <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa939>.
- Pascal Morenton. S'équiper d'un détecteur de CO2 pour favoriser l'aération des locaux confinés. 2021a. URL [http://lafabrique.centralesupelec.fr/webinaire{CO2}/document/presentation\\_PM\\_webinaire{CO2}\\_v5\\_bpd.pdf](http://lafabrique.centralesupelec.fr/webinaire{CO2}/document/presentation_PM_webinaire{CO2}_v5_bpd.pdf).
- Pascal Morenton. Fabriquer un détecteur de CO2. 2021b. URL [http://nousaerons.fr/makersco2/documents/co2meter\\_nousaerons\\_cablage\\_v9-1.pdf](http://nousaerons.fr/makersco2/documents/co2meter_nousaerons_cablage_v9-1.pdf).
- Pascal Morenton. Fabriquer un détecteur de CO2 pour favoriser l'aération d'un local. Technical report, Université Paris-Saclay, 2021c. URL <https://nousaerons.fr/makers{CO2}/>.
- NCS-TF. The role of aerosols in SARS-CoV-2 transmission, October 2020. URL [https://sciencetaskforce.ch/wp-content/uploads/2020/11/The\\_role\\_of\\_aerosols\\_in\\_{SARS-CoV-2}Transmission29Oct20-EN.pdf](https://sciencetaskforce.ch/wp-content/uploads/2020/11/The_role_of_aerosols_in_{SARS-CoV-2}Transmission29Oct20-EN.pdf).
- Miquel Oliu-Barton, Bary S R Pradelski, Philippe Aghion, Patrick Artus, Ilona Kickbusch, Jeffrey V Lazarus, Devi Sridhar, and Samantha Vanderslott. SARS-CoV-2 elimination, not mitigation, creates best outcomes for health, the economy, and civil liberties. *The Lancet*, 2021/04/29 2021. doi: 10.1016/S0140-6736(21)00978-8. URL [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)00978-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)00978-8).
- Z. Peng, W. Bahnfleth, G. Buonanno, S. J. Dancer, J. Kurnitski, Y. Li, M. G. L. C. Loomans, L. C. Marr, L. Morawska, W. Nazaroff, C. Noakes, X. Querol, C. Sekhar, R. Tellier, T. Greenhalgh, L. Bourouiba, A. Boerstra, J. Tang, S. Miller, and J. L. Jimenez. Indicators for risk of airborne

transmission in shared indoor environments and their application to COVID-19 outbreaks. *medRxiv*, page 2021.04.21.21255898, 01 2021. doi: 10.1101/2021.04.21.21255898. URL <http://medrxiv.org/content/early/2021/04/27/2021.04.21.21255898.abstract>.

Zhe Peng and Jose L. Jimenez. Exhaled CO<sub>2</sub> as a COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities. *Environmental Science & Technology Letters*, 04 2021. doi: 10.1021/acs.estlett.1c00183. URL <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00183>.

Viola Priesemann, Melanie M Brinkmann, Sandra Ciesek, Sarah Cuschieri, Thomas Czypionka, Giulia Giordano, Deepti Gurdasani, Claudia Hanson, Niel Hens, Emil Iftekhar, Michelle Kelly-Irving, Peter Klimek, Mirjam Kretzschmar, Andreas Peichl, Matjaž Perc, Francesco Sannino, Eva Schernhammer, Alexander Schmidt, Anthony Staines, and Ewa Szczurek. Calling for pan-european commitment for rapid and sustained reduction in SARS-CoV-2 infections. *The Lancet*, 397(10269):92–93, 2021a. doi: 10.1016/S0140-6736(20)32625-8. URL [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)32625-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)32625-8).

Viola Priesemann, Melanie M Brinkmann, Sandra Ciesek, Sarah Cuschieri, Thomas Czypionka, Giulia Giordano, Deepti Gurdasani, Claudia Hanson, Niel Hens, Emil Iftekhar, Michelle Kelly-Irving, Peter Klimek, Mirjam Kretzschmar, Andreas Peichl, Matjaž Perc, Francesco Sannino, Eva Schernhammer, Alexander Schmidt, Anthony Staines, and Ewa Szczurek. Appello per un impegno pan-europeo per una riduzione rapida e duratura delle infezioni da SARS-CoV-2. Technical report, 2021b. URL <https://www.containcovid-pan.eu/statement/lowNumbers/Italian>.

Hannah Ritchie and Max Roser. CO<sub>2</sub> and greenhouse gas emissions. Web page, Our World in Data, 2020. URL <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.

Mario Rohrer, Antoine Flahault, and Markus Stoffel. Peaks of fine particulate matter may modulate the spreading and virulence of COVID-19. *Earth Systems and Environment*, 4(4):789–796, 2020. doi: 10.1007/s41748-020-00184-4. URL <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00184-4>.

Selena Ross. Quebec schools without air purifiers have 3 to 4 times more COVID-19 cases, says dad running citizen count. Web page, CTV News, 2021. URL [https://beta.ctvnews.ca/local/montreal/2021/4/23/1\\_5400739.html](https://beta.ctvnews.ca/local/montreal/2021/4/23/1_5400739.html).

- SAGE. Role of ventilation in controlling SARS-CoV-2 transmission. Technical report, 2020a. URL [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/928720/S0789\\_EMG\\_Role\\_of\\_Ventilation\\_in\\_Controlling\\_{SARS-CoV-2}\\_Transmission.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/928720/S0789_EMG_Role_of_Ventilation_in_Controlling_{SARS-CoV-2}_Transmission.pdf).
- SAGE. Mitigations to reduce transmission of the new variant SARS-CoV-2 virus. Technical report, December 2020b. URL [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/948607/s0995-mitigations-to-reduce-transmission-of-the-new-variant.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/948607/s0995-mitigations-to-reduce-transmission-of-the-new-variant.pdf).
- M. Simoni, I. Annesi-Maesano, T. Sigsgaard, D. Norback, G. Wieslander, W. Nystad, M. Canciani, P. Sestini, and G. Viegi. School air quality related to dry cough, rhinitis and nasal patency in children. *European Respiratory Journal*, 35(4):742, 04 2010. doi: 10.1183/09031936.00016309. URL <http://erj.ersjournals.com/content/35/4/742.abstract>.
- Marzia Simoni, Gui-Hong Cai, Dan Norback, Isabella Annesi-Maesano, François Lavaud, Torben Sigsgaard, Gunilla Wieslander, Wenche Nystad, Mario Canciani, Giovanni Viegi, and Piersante Sestini. 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, 2011. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3038.2011.01208.x>. URL <https://doi.org/10.1111/j.1399-3038.2011.01208.x>.
- Greta Smedje and Dan Norbäck. New ventilation systems at select schools in sweden—effects on asthma and exposure. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 55(1): 18–25, 2000. URL <https://doi.org/10.1080/00039890009603380>.
- L. Stabile, A. Pacitto, A. Mikszewski, L. Morawska, and G. Buonanno. Ventilation procedures to minimize the airborne transmission of viruses at schools. *medRxiv*, page 2021.03.23.21254179, 01 2021. doi: 10.1101/2021.03.23.21254179. URL <http://medrxiv.org/content/early/2021/03/24/2021.03.23.21254179.abstract>.
- Tess M. Stafford. Indoor air quality and academic performance. *Journal of Environmental Economics and Management*, 70:34–50, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2014.11.002>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0095069614001016>.
- J. W. Tang, W. P. Bahnfleth, P. M. Bluyssen, G. Buonanno, J. L. Jimenez, J. Kurnitski, Y. Li, S. Miller, C. Sekhar, L. Morawska, L. C. Marr, A. K. Melikov, W. W. Nazaroff, P. V. Nielsen,



- R. Tellier, P. Wargocki, and S. J. Dancer. Dismantling myths on the airborne transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus-2 (SARS-CoV-2). *Journal of Hospital Infection*, 110:89–96, April 2021. doi: 10.1016/j.jhin.2020.12.022. URL <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.12.022>.
- The New York Times. Why opening windows is a key to reopening schools, 2021. URL <https://www.nytimes.com/interactive/2021/02/26/science/reopen-schools-safety-ventilation.html>.
- Oluyemi Toyinbo, Markus Matilainen, Mari Turunen, Tuula Putus, Richard Shaughnessy, and Ulla Haverinen-Shaughnessy. Modeling associations between principals’ reported indoor environmental quality and students’ self-reported respiratory health outcomes using glmm and zip models. *International journal of environmental research and public health*, 13(4):385, 2016. URL <https://doi.org/10.3390/ijerph13040385>.
- Florentina Villanueva, Elena Jiménez, José Manuel Felisi, Tomás Garrido, José Luis Jiménez, Mila Ródenas, and Amalia Muñoz. Guide about affordable CO2 detectors for COVID-19 prevention. Technical report, 2021. URL <https://bit.ly/monitors{CO2}>.
- WHO. Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19. Technical report, World Health Organization, Geneva, Switzerland, 2021a. URL <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/339857/9789240021280-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- WHO. Coronavirus disease (COVID-19): How is it transmitted? Web page, World Health Organization, Geneva, Switzerland, April 2021b. URL <https://www.who.int/news-room/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted>.
- X. Wu, R. C. Nethery, M. B. Sabath, D. Braun, and F. Dominici. Air pollution and COVID-19 mortality in the united states: Strengths and limitations of an ecological regression analysis. *Science Advances*, 6(45):eabd4049, 11 2020. doi: 10.1126/sciadv.abd4049. URL <http://advances.sciencemag.org/content/6/45/eabd4049.abstract>.
- M Zaatari and M Harmon. Open letter to address the use of electronic air cleaning equipment in buildings, 2021. URL <https://medium.com/open-letter-to-address-the-use-of-electronic-air/no-to-ionizers-plasma-uvpco-bc1570b2fb9b>.

# Indice

<b>1. Sintesi</b>	<b>2</b>
1.1. Organizzazione del documento . . . . .	3
<b>2. Rischio contagio COVID-19 via aerosol</b>	<b>5</b>
2.1. Note bibliografiche su aerosol-COVID-19 . . . . .	5
2.2. Un pesante bilancio . . . . .	6
<b>3. Il pessimo stato della ventilazione nelle scuole in Italia</b>	<b>9</b>
<b>4. Ventilazione naturale, opportunità e limiti</b>	<b>11</b>
<b>5. Interventi di breve e medio periodo</b>	<b>13</b>
5.1. La ventilazione meccanica controllata . . . . .	13
5.2. Sensori di CO <sub>2</sub> . . . . .	13
5.3. Purificatori portatili HEPA . . . . .	14
5.4. Quadro economico degli interventi . . . . .	15
<b>6. Co-benefici della ventilazione nelle scuole</b>	<b>23</b>
<b>A. Stima del tasso di ricambio d'aria con un sensore di CO<sub>2</sub></b>	<b>27</b>
<b>B. Sensori di CO<sub>2</sub>, dati aperti e attivismo civico</b>	<b>29</b>
<b>C. Tecnologie di purificazione dell'aria <i>non validate</i> per un uso nelle scuole</b>	<b>31</b>

# Elenco delle figure

2.1. "Goccioline" vs "aerosol" . . . . .	7
2.2. Relatività del distanziamento . . . . .	8
3.1. Ventilazione media nelle aule scolastiche in Italia e in paesi europei dove gli impianti di ventilazione sono comuni . . . . .	9
3.2. Estratto dal documento WHO [2021a] sulla ventilazione per ridurre il rischio contagio COVID-19 . . . . .	10
4.1. Infografica del The New York Times [2021] su una simulazione basata sulla fuidodinamica dell'aerosol in un'aula scolastica . . . . .	11
5.1. Confronto tra tecnologie dei sensori CO <sub>2</sub> . . . . .	15
5.2. CO <sub>2</sub> come indicatore prossimale di rischio relativo vs assoluto . . . . .	17
5.3. Soglie CO <sub>2</sub> consigliate dal Prof. J. L. Jemenez in assenza e presenza di filtri HEPA	18
5.4. Definizione di rischio per locali interni in termini di aria re-inalata stimata in base alla concentrazione di CO <sub>2</sub> , linee guida Harvard, Allen et al. [2020], e IDAEA- CSIC-LIFTEC, Minguillón et al. [2020], infografica di El Pais [2021] . . . . .	19
5.5. Esempio di misure di qualità dell'aria in continuo in un'aula scolastica . . . . .	20
5.6. Altre misure di CO <sub>2</sub> in varie giornate scolastiche . . . . .	21
5.7. Auto-costruzione di sensori di CO <sub>2</sub> . . . . .	22
6.1. Misure di CO <sub>2</sub> e didattica . . . . .	25
6.2. Bauhaus . . . . .	26
A.1. Procedura per la stima del tasso di ricambio d'aria, ACH . . . . .	28
B.1. <i>Data Hero</i> . . . . .	30

C.1. Le indicazioni del comitato sulla sicurezza negli edifici della commissione COVID-19 di <i>The Lancet</i> , Aprile 2021 . . . . .	32
--	----

## Elenco delle tabelle

5.1. Quadro economico degli interventi di breve e medio periodo . . . . .	22
6.1. Vantaggi aggiuntivi di una maggiore ventilazione e di una migliore qualità dell'aria nelle scuole oltre a quelli della mitigazione delle malattie infettive trasmesse per via aerea (traduzione della Tab. 1 in Corsi et al. [2021]) . . . . .	24