

Misure per contrastare l'emergenza durante l'epidemia da SARS-CoV-2: perché il controllo efficace della diffusione del contagio non può prescindere dal controllo dell'umidità dell'aria ambiente

(versione sintetica divulgativa; l'articolo di riferimento è: “Fantini, M.P.; Gori, D.; Guzzini, A.; Pellegrini, M.; Re, M.C.; Reno, C.; Roncarati, G.; Saccani, C.; Vocale, C. (2020). *Analisi della trasmissione di SARS-CoV-2: influenza delle condizioni termoigrometriche rispetto al rischio di diffusione del contagio*. <http://amsacta.unibo.it/6521/>. DOI:10.6092/unibo/amsacta/6521”)

Autori: Cesare Saccani*, Alessandro Guzzini, Marco Pellegrini.

* cesare.saccani@unibo.it

È ormai noto dalla letteratura scientifica che la trasmissione diretta del virus SARS-CoV-2 da un soggetto infetto ad un soggetto suscettibile avvenga attraverso le goccioline che sono emesse, per esempio, con il respiro, durante la conversazione, con un colpo di tosse o con uno starnuto. Per questo motivo, il primo punto da cui partire per studiare una strategia efficace di controllo della diffusione del contagio è lo studio del percorso che le goccioline contaminate fanno una volta emesse. Nota la traiettoria può essere definita la distanza interpersonale oltre alla quale due o più individui possono permanere con probabilità di contaminazione molto piccola.

Sebbene possa apparire banale, studiare la traiettoria di una gocciolina in aria è un problema complesso che richiede strumenti propri della Fisica Tecnica e dell'Ingegneria Impiantistica, in particolare quella dedicata allo studio dell'Ingegneria dei Flussi Multifase, in termini anglosassoni Multiphase Flow Engineering. In generale la traiettoria (ovvero la gittata) di una particella è individuata dallo studio del sistema di forze che agiscono su di essa: nello schema più semplice, la forza peso, che tende a farla depositare al suolo, e le forze di resistenza aerodinamica e di galleggiamento, che tendono, invece, a rallentare, ovvero a contrastare la sua caduta. Queste forze, a loro volta, dipendono da più fattori fra cui la dimensione e la forma della particella stessa. Occorre osservare che, nel caso di goccioline, a differenza, del caso di particelle solide, la dimensione cambia continuamente lungo la traiettoria a seguito di un altro fenomeno fisico: l'evaporazione del liquido di cui è costituita.

Nella figura 1 sono evidenziate due gocce di diametro rispettivamente pari a D_0 e D_1 , dove D_0 è maggiore di D_1 . Naturalmente alla gocciolina di diametro iniziale maggiore, cioè D_0 , corrisponde una velocità di caduta libera, cioè la velocità con cui la goccia precipita al suolo, maggiore. Conseguentemente la gittata della goccia di diametro D_1 , cioè la distanza longitudinale fra la bocca e il punto in cui tocca il suolo, a meno che non sia completamente evaporata prima, risulta maggiore.

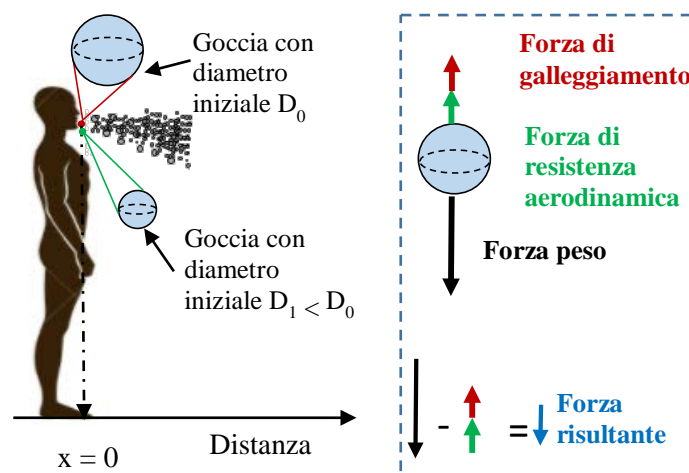


Figura 1. Equilibrio delle forze che agiscono sulle gocce emesse dall'individuo.

Pertanto l'identificazione di un valore corretto della distanza di sicurezza deve essere ricondotto ad un modello termo-fluidodinamico la cui soluzione dipende non solo dalle caratteristiche della particella, ma anche da quelle dell'aria ambiente in cui questa si muove.

Naturalmente la statistica è una scienza che può dire molto a supporto della trattazione che segue, ma, per non complicare troppo il modello, si seguirà una trattazione di tipo deterministico, ovvero si farà riferimento a precisi valori dei parametri, eventualmente medi.

Per caratterizzare il moto delle goccioline è necessario disporre di una serie di dati: dapprima occorre conoscere dimensioni e numero delle goccioline alla partenza, ovvero all'atto dell'emissione. Ora, in letteratura non ci sono prove che dimostrino che la presenza all'interno della gocciolina dei virioni, termine medico che indica la particella virale, influenzi il numero e le dimensioni delle goccioline emesse. Tale affermazione può essere ragionevolmente basata sul fatto che il virione ha dimensioni medie dell'ordine dei 0.1 micron [1] mentre circa il 79% delle goccioline emesse, nel caso, per esempio, di una conversazione, ha un diametro compreso fra 50 e 125 micron [2]. In figura 2 si riporta un'immagine tratta da [3] per il confronto delle dimensioni del virione con altre particelle quali i bacilli, il particolato PM 2.5, i globuli rossi e il particolato PM 10.

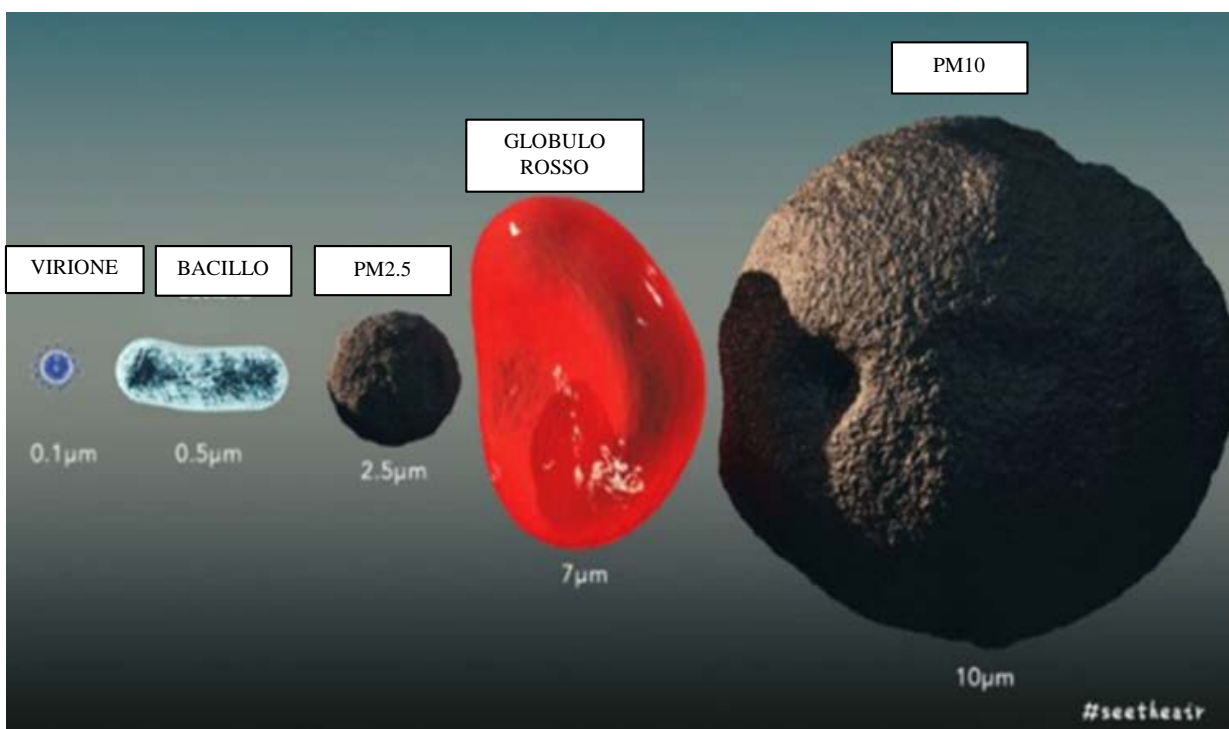


Figura 2. Confronto fra le dimensioni del virione di SARS-CoV-2 con altre particelle. Immagine tratta da [3].

Le dimensioni delle goccioline dipendono dalla tipologia di atto fonatorio (ad esempio, parlare a bassa voce o ad alta voce, cantare, tossire, starnutare, etc.) [4].

I primi tentativi di misurare le dimensioni delle goccioline emesse risalgono al 1899 a riprova del fatto che l'interesse scientifico verso questo tipo di indagine ha radici lontane nel tempo. [5].

La letteratura tecnico-scientifica fornisce indicazioni anche sul numero di goccioline emesse. Come per le dimensioni, anche il numero dipende dall'atto tramite il quale sono emesse. Per esempio, nel caso di una conversazione di durata pari ad un minuto e mezzo, Xie et al. (2009) hanno misurato sperimentalmente che un individuo emette mediamente 760 goccioline fino ad un valore massimo di 2750 [6]. Occorre a questo proposito osservare che sia il numero che le dimensioni delle goccioline variano da individuo a individuo. Pertanto, in assenza di un'analisi statistica che permetta di

identificare un intervallo di valori plausibili, in gergo tecnico intervallo di confidenza, per gruppi di individui aventi caratteristiche in comune quali, per esempio, lingua parlata, età, sesso, etc...., le valutazioni seguenti sono basate sui valori medi presenti nella letteratura scientifica più accreditata.

Sebbene siano note le dimensioni ed il numero delle goccioline alla partenza, per studiare l'effetto contaminante dovuto alla loro inalazione occorre fare un'ulteriore passo in avanti. Il soggetto suscettibile, infatti, si trova ad una certa distanza dal punto di emissione. Pertanto, per via dell'evaporazione, le goccioline contaminate inalate non sono corrispondenti a quelle emesse. Per esempio, alcune gocce evaporano completamente prima di raggiungere il soggetto suscettibile. Viceversa, altre potrebbero raggiungere il soggetto con una dimensione e, quindi, con una concentrazione virale più elevata rispetto a quella di partenza. La concentrazione virale, infatti, è definita come il numero di virioni contenuto nella goccia diviso il volume della stessa. Ora, poiché a seguito di evaporazione il volume della goccia si riduce lungo la traiettoria, la concentrazione virale aumenta, potendo così raggiungere un valore massimo calcolabile in accordo con [2].

Dunque, i parametri che regolano l'evaporazione della goccia hanno effetto sia sulla distanza media di sicurezza che sull'intensità del fenomeno contaminante. Fra quelli coinvolti, la percentuale di umidità dell'aria (o grado igrometrico) in cui le goccioline si muovono riveste un ruolo fondamentale rispetto al tempo in cui una gocciolina può permanere in ambiente e, quindi, sulla sua traiettoria, da cui dipende strettamente la distanza di sicurezza. Il concetto di umidità dell'aria racchiude un meccanismo fisico ben noto per cui l'aria, a parità di pressione, si comporta di fatto come una spugna: quando la temperatura è relativamente alta, la "spugna" tende ad assorbire più vapore d'acqua dall'ambiente, mentre con basse temperature l'effetto è il contrario, ovvero l'aria diminuisce via via la sua capacità di trattenere vapore d'acqua fino a che non si raggiunge una condizione in cui il vapore stesso condensa, ovvero viene rilasciato in ambiente in forma liquida. Quando questo avviene significa che abbiamo raggiunto e superato la temperatura di "saturazione" dell'aria, ovvero l'aria dopo aver raggiunto un grado igrometrico pari al 100% continua a diminuire la sua temperatura liberando acqua nell'ambiente sotto forma di condensa.

Questo fenomeno deve essere adeguatamente considerato nel valutare la distanza di sicurezza. Sarebbe sbagliato non farlo come dimostrano le figure 3A e 3B. In esse è riportato il tempo di evaporazione totale di goccioline al variare dell'umidità dell'aria ambiente e del diametro iniziale. In particolare, la figura 3B riporta, per una più agevole lettura, il tempo di evaporazione per le gocce di diametro pari a 10 μm e 100 μm , in funzione dell'umidità dell'aria, evidenziate rispettivamente in rosso e in blu nella figura 3A. Questo fenomeno è ben noto in letteratura come dimostra il fatto che i primi modelli proposti da Wells sono stati pubblicati nel 1934 e, in seguito, rielaborati da Kukkonen et al (1989) e Xie et al. (2007) [7,8,9].

FIGURA 3A: TEMPO DI SOPRAVVIVENZA DELLE GOCCIOLINE IN EVAPORAZIONE VS UMIDITA'

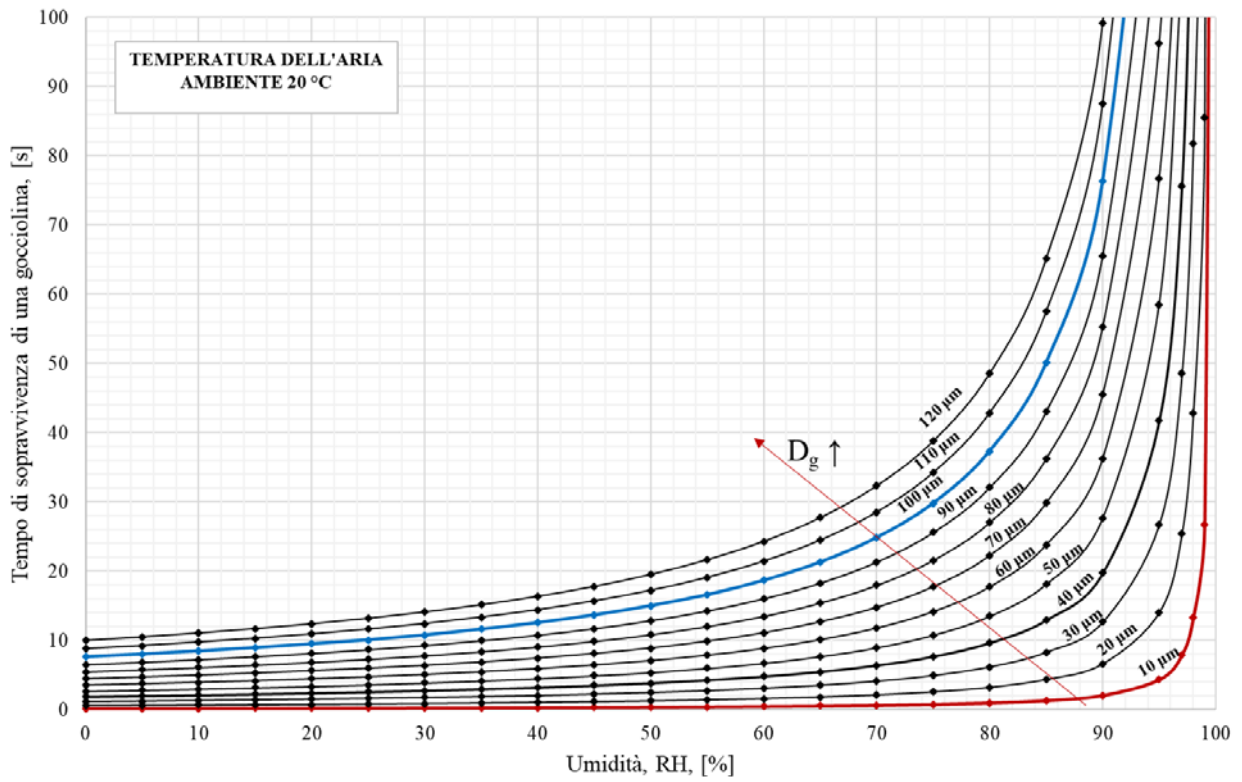


FIGURA 3B: TEMPO DI SOPRAVVIVENZA DELLE GOCCIOLINE IN EVAPORAZIONE PER DIAMETRO INIZIALI PARI A 10µm e 100µm

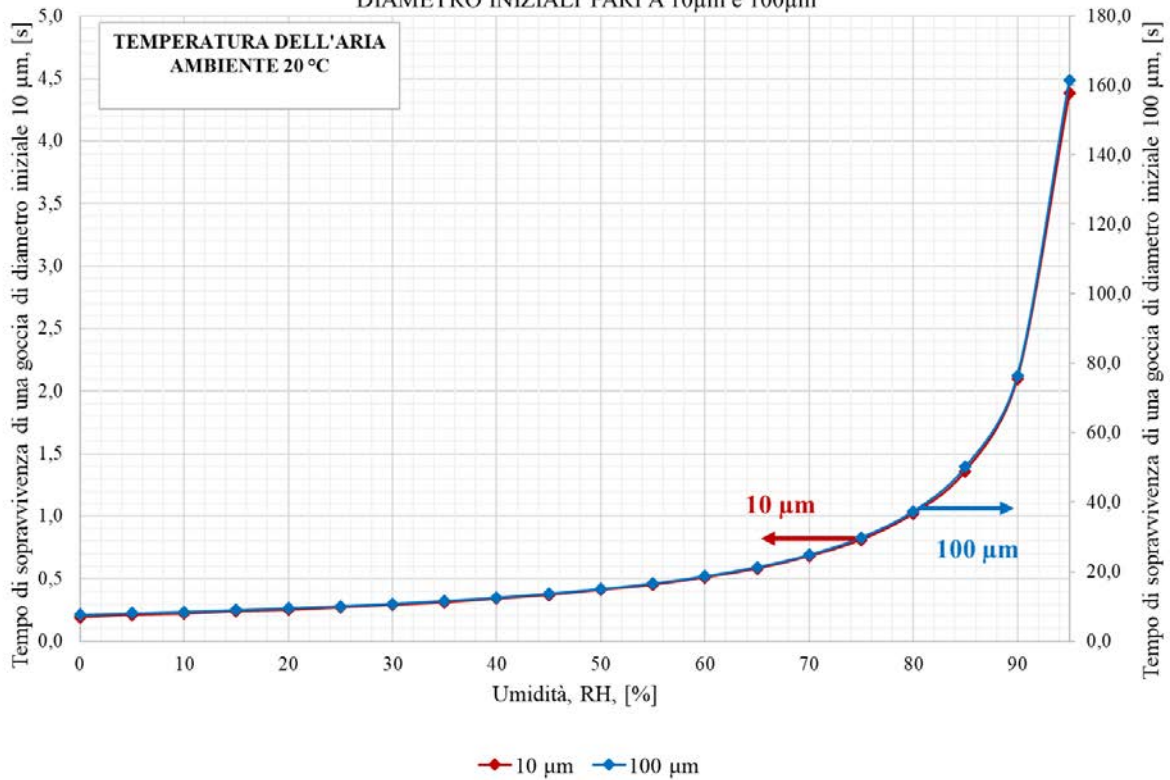


FIGURA 3. Tempo di sopravvivenza delle goccioline in aria ambiente al variare del diametro e dell'umidità (Figura 3A). Le valutazioni fanno riferimento ad una temperatura dell'aria pari a 20 °C. La figura 3B riporta l'ingrandimento per le

goccioline di diametro iniziale pari a 10 μm (rosso) e 100 μm (blu). Le curve appaiono praticamente sovrapposte, pur facendo riferimento a scale diverse (valori in ordinata a destra, per particelle da 100 μm e sinistra, da 10 μm).

Dalla figura è evidente l'effetto dell'umidità dell'aria ambiente in riferimento al tempo impiegato da una gocciolina per evaporare (riportato in ascissa). Si noti che le due curve sono, praticamente, sovrapposte. Si prenda a riferimento, per esempio nella figura 3B, la goccia di diametro pari a 10 micron, la cui curva, in rosso, è indicata con la simbologia 10 μm . Quando la gocciolina si trovi in un ambiente relativamente secco, cioè con basso contenuto di umidità, per esempio 50%, allora l'acqua presente nella gocciolina evapora molto rapidamente: siamo nell'intorno di 40 centesimi di secondo (0.4 secondi). Se, invece, la gocciolina venisse emessa in un ambiente con alto contenuto di umidità, per esempio 90%, tende a scomparire molto più lentamente. In questo secondo caso la goccia da 10 micron impiega più di 2 secondi ad evaporare completamente, ovvero cinque volte tanto rispetto al caso di umidità al 50%. E se gli diamo più tempo, sotto certe condizioni, può viaggiare più lontano. Di conseguenza, aumentando il tempo in cui la gocciolina sopravvive nell'ambiente, la distanza percorsa una volta emessa può essere molto maggiore. In altre parole, l'ambiente risulta essere molto più favorevole al contagio.

Cosa accade nel caso di goccioline di diametro maggiore? L'andamento delle due curve, come mostrato dal grafico, è lo stesso. Dunque, indipendente dalle dimensioni iniziali della goccia, all'aumentare dell'umidità dell'aria ambiente, il tempo impiegato dalle goccioline per evaporare aumenta. Si prendano per esempio le goccioline da 100 micron. Nelle stesse condizioni di umidità analizzate prima, ossia 50% e 90%, la goccia evaporerebbe completamente in un tempo pari, rispettivamente, a circa 15 secondi e 77 secondi. In realtà, ciò che accade è che le goccioline più grandi terminano il loro viaggio molto prima di essere completamente evaporate. Esse si depositano sulle superfici che incontrano scendendo e lì permangono per periodi relativamente lunghi (a seconda della loro dimensione residua e dell'umidità ambientale) prima di essere completamente evaporate. Ciò è chiaramente mostrato in figura 4, tratta da [2]. Nella figura ciascuna curva presenta una cuspidè (segnalata in figura), a cui corrisponde un "diametro critico" (rilevato sulla corrispondente ordinata). A sinistra della cuspidè le goccioline hanno un diametro che le porta a completa evaporazione prima di toccare il suolo, mentre a destra della cuspidè il diametro delle gocce (che va crescendo verso destra) è tale da consentire loro di toccare il suolo da un'altezza di 2 metri senza essere completamente evaporate. Nel caso di umidità dell'aria ambiente pari a 90% (curva azzurra) il diametro soglia è pari a 60 μm . Pertanto, in tali condizioni, una goccia da 60 μm completa la sua evaporazione in circa 35 secondi, proprio mentre sta per toccare il suolo, mentre una goccia da 80 μm , il cui diametro rileviamo nella parte destra della cuspidè, sempre sulla curva azzurra, precipita in circa 13 secondi dall'emissione toccando il suolo prima di essere completamente evaporata. Anche per le gocce che toccano il suolo, all'aumentare dell'umidità, corrisponde un aumento del tempo di sopravvivenza sulle superfici e, quindi, un aumento del rischio di diffusione del contagio per trasmissione, in questo caso, indiretta. Se esaminiamo il caso di umidità ambientale pari al 50%, la goccia da 80 μm evapora in un tempo di circa 10 secondi, ovvero prima di essere caduta al suolo, annullando, così, il rischio di trasmissione indiretta come si deduce sempre dalla figura 4.

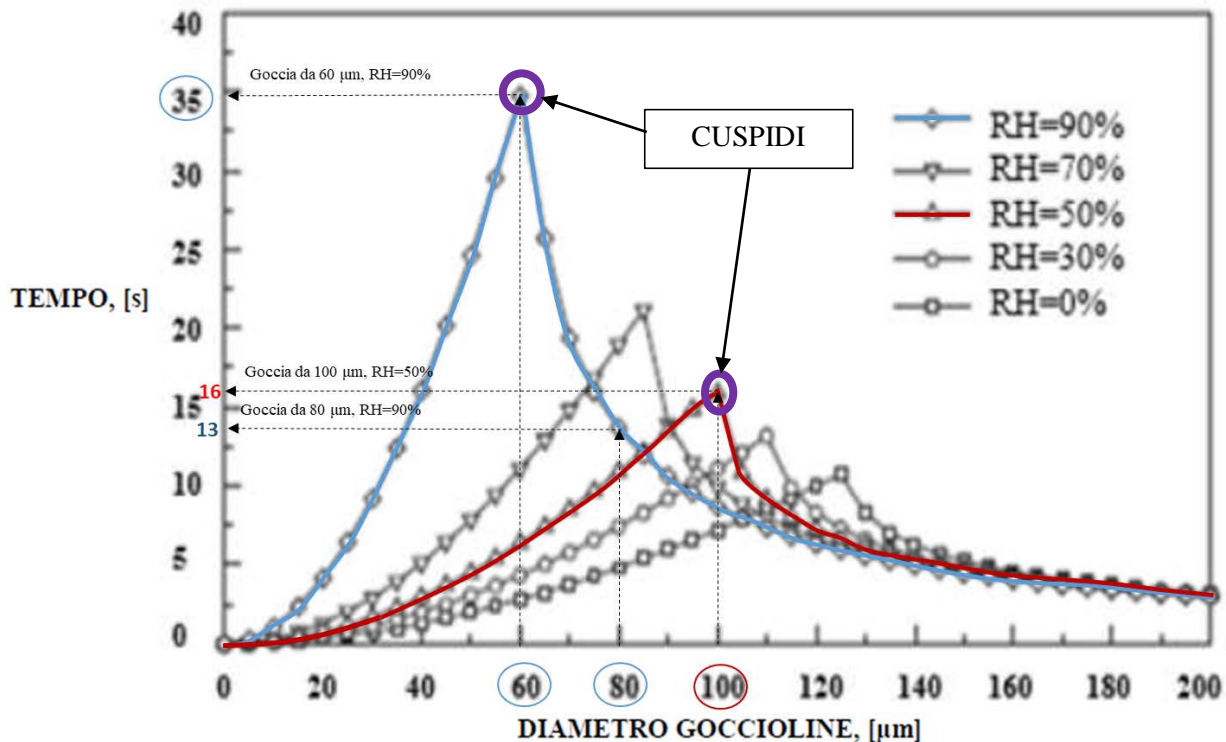


Figura 4. Curva tratta da [2] al variare delle condizioni di umidità relativa (RH) in ambiente. La temperatura ambientale è assunta costante e pari a 18 °C.

Pertanto, all'aumentare dell'umidità ambiente il diametro iniziale al di sopra del quale le gocce si depositano prima di essere completamente evaporate diminuisce. Si faccia riferimento alla figura 5 in cui si evidenzia la diminuzione del diametro delle gocce, per evaporazione, a partire da diametri rilevati all'istante iniziale (il Tempo=0 corrisponde all'istante dell'emissione della goccia) pari a 60 µm (curva blu), 70 µm (curva gialla), 80 µm (curva arancione) e 100 µm (curva grigia). L'umidità dell'aria ambiente è assunta pari al 90%. Si prenda in considerazione la curva grigia. La goccia che inizialmente ha una dimensione pari a 100 µm si deposita al suolo dopo un tempo di circa 8 secondi (calcolato in base alla figura 4), quindi raggiunge il suolo con un diametro pari a 92 µm (figura 5), cioè con un volume che è circa il 78% di quello iniziale. Analogamente la goccia che inizialmente ha un diametro di 80 µm, si deposita al suolo dopo 13 secondi (ancora figura 4) e, quindi, dopo essere evaporata fino a 67 µm, ovvero con un volume che è circa il 59% di quello di partenza. La goccia da 70 µm si deposita dopo circa 19 secondi dall'emissione dopo essere evaporata fino a raggiungere un volume che è il 32% di quello iniziale. La goccia da 60 µm completa la sua evaporazione nell'istante in cui raggiunge il suolo dopo circa 35 secondi.

Le gocce più grandi (sopra ai 30-50 µm, come ordine di grandezza) vengono fermate dalla mascherina perché la loro dimensione consente di urtare direttamente la superficie della maschera (impatto). In particolare, tanto più è grande la goccia tanto maggiore è l'efficacia filtrante della mascherina perché le gocce grandi vengono proiettate direttamente sulla superficie della maschera stessa.

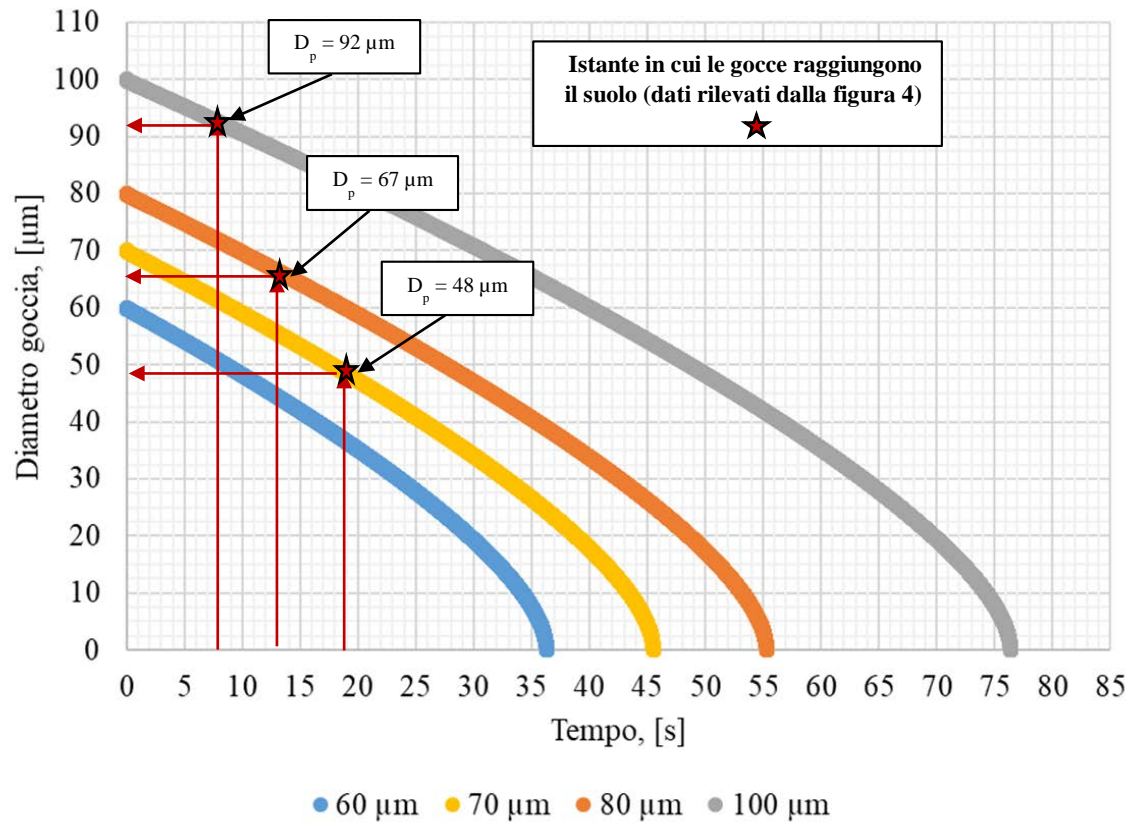


Figura 5. Diminuzione del diametro delle gocce per evaporazione in funzione del tempo in caso di umidità pari al 90%.

Nella seguente figura 6 è riportato il percorso delle gocce in condizioni di umidità pari al 50%. La figura, tratta da [2], assume che le gocce escano dalla bocca con una velocità, definita come “velocità di lancio”, pari a 10 m/s, cioè prossima a quella media di un colpo di tosse (11.7 m/s) e più del doppio di quella tipica durante l’attività fonatoria, pari a 3.9 m/s. In queste condizioni, le gocce da 40 μm raggiungono una distanza pari a circa 2.2 metri prima di evaporare. Cambiando umidità e temperatura, sulla base delle considerazioni precedenti, è logico attendersi percorsi e, dunque, distanze raggiunte dal punto di emissione differenti.

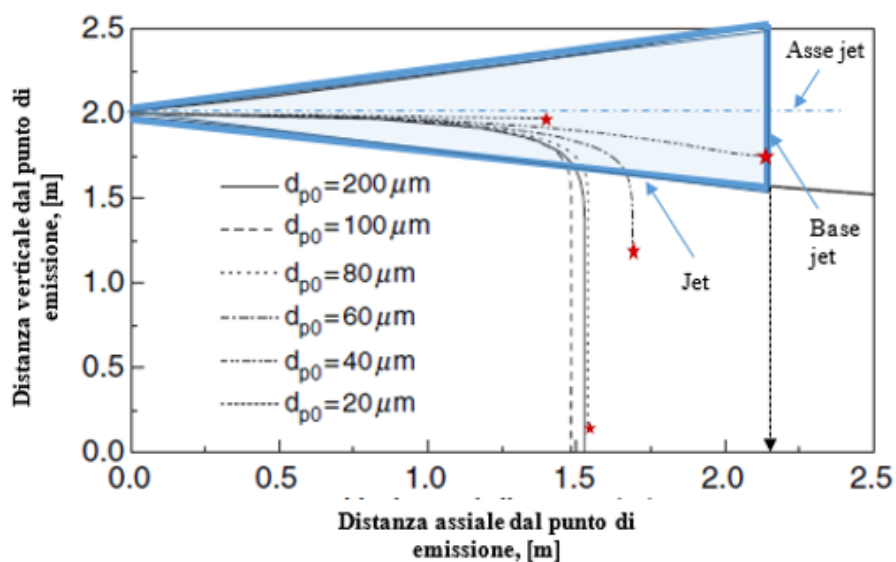


Figura 6. Immagine tratta da Xie et al. (2007). Distanza verticale ed assiale dalla bocca a temperatura dell'aria di 20°C e umidità dell'aria circostante pari a RH = 50%. Le distanze sono state calcolate per velocità di lancio pari a 10 m/s, cioè prossima a quella media di un colpo di tosse (11.7 m/s) e più del doppio di quella tipica durante l'attività fonatoria, pari a 3.9 m/s. Nella figura si è inoltre indicato con il simbolo a "stella" il punto di completa evaporazione della goccia

A supporto di queste affermazioni si consideri un esperimento realizzato da studiosi giapponesi e riportato dall'emittente televisiva giapponese NHK e che ha suscitato una notevole risonanza mediatica in Italia [10]. Prima di procedere occorre sottolineare che questo studio approccia in maniera del tutto inappropriata dal punto di vista metodologico lo scopo della propria ricerca. Gli studiosi giapponesi, attraverso sofisticati strumenti laser in grado di rilevare la presenza di goccioline, anche piccolissime, e misurarne la dimensione, hanno monitorato la nuvola di gocce emesse da un soggetto durante diversi atti di fonazione, trascurando completamente l'impatto dell'umidità dell'aria nell'ambiente confinato in cui l'esperimento aveva luogo. Le conclusioni dello studio sono due. La prima è che dopo pochi minuti le gocce di saliva più grandi si depositano sul terreno. La seconda è che le gocce più piccole restano sospese nell'aria per un tempo assai lungo misurato dai ricercatori pari a venti minuti per le dimensioni più piccole. Qual è dunque la soluzione proposta al problema? Semplicemente aprire le finestre e ventilare l'ambiente chiuso.

L'esperimento dimostra ben altro. Se l'ambiente in cui le goccioline vengono emesse è saturo (come doveva evidentemente essere l'ambiente in cui è stato fatto il test, dati i lunghissimi tempi di permanenza rilevati), le goccioline, siano esse grandi o piccole, non evaporano perché l'aria ambiente non può assorbirne il contenuto di acqua. A questa conclusione si può arrivare facendo riferimento tanto alla letteratura tecnico-scientifica, quanto alla comune esperienza quotidiana: quando si fa la doccia il vetro della finestra del bagno, oppure lo specchio, si appanna e, per togliere la condensa, si aera il locale. Pertanto, la dinamica descritta dai ricercatori giapponesi sarebbe anche potuta essere corretta se in premessa fosse stato chiarito che tali condizioni si presentano in ambienti saturi. Quando, poi, si trovi soluzione nello spalancare la finestra, rigore scientifico e metodologico imporrebbe la misura dei parametri termo igrometrici esterni: se fuori avessimo avuto una fitta nebbia, a poco sarebbe servito aprire la finestra, se non a peggiorare le condizioni dell'ambiente confinato.

Come scritto poco sopra, l'umidità dell'aria ambiente ha un effetto anche sull'intensità del fenomeno contaminante. Quali sono, infatti, le goccioline più "pericolose"? Quelle più piccole, come sembrerebbe indicare l'esperimento giapponese?

Per rispondere al quesito si consideri che un soggetto infetto emetta una goccia da 100 micron contenente un certo numero di virioni, assumiamo 610.000 virioni [2]. Evaporando lungo la traiettoria, la goccia va incontro ad una riduzione di volume che produce un effetto molto pericoloso: mano a mano che la gocciolina grande perde acqua per evaporazione, si riduce il suo volume. A questa diminuzione di volume si accompagna un incremento della concentrazione virale trasportata: infatti, supponendo che il singolo virus (o virione) non subisca gli effetti dell'evaporazione dell'acqua contenuta nella gocciolina, esso verrà ad essere trasportato da una gocciolina via via sempre più piccola. Questo è un fenomeno estremamente rilevante in quanto è ragionevole pensare che in soggetti con stessa risposta difensiva, all'aumentare della concentrazione virale della goccia contaminante corrisponda una maggiore rapidità dell'azione virale e, quindi, una maggiore aggressività della carica virale [2].

La concentrazione virale, tuttavia, non aumenta all'infinito con l'avanzare dell'evaporazione. Al contrario esiste una dimensione minima al di sotto della quale la goccia non può più contenere i virioni iniziali. Per esempio, nel caso sopra citato, la dimensione minima per contenere 610.000 virioni, secondo un calcolo puramente geometrico, è pari a 10 micron [2]. Superata questa soglia, la goccia inizia a rilasciare i virioni nell'aria ambiente che circonda la goccia, i quali iniziano a diffondersi con modalità cosiddetta airborne e secondo un modello di diffusione browniana (uniformemente diffusi nell'ambiente che li contiene), date le dimensioni del virione. La domanda

che sorge spontanea a questo punto è: qual è l'effetto di questi virioni rilasciati in aria in riferimento alla diffusione del contagio? Infatti, la completa evaporazione della goccia, con il conseguente rilascio del contenuto virale in aria, potrebbe suggerire una condizione apparentemente allarmante.

Per rispondere al quesito, assumiamo la condizione peggiore che vi possa essere nel nostro esempio, ossia il rilascio di tutti i 610.000 virioni in un volume relativamente piccolo e circostante la gocciolina in via di evaporazione che assumiamo, per esempio, pari ad un centimetro cubo, ovvero un millilitro. In queste condizioni la concentrazione virale nel cubetto considerato che va a contenere i 610.000 virioni liberati dalla gocciolina, è quasi due miliardi di volte inferiore rispetto alla concentrazione massima ottenuta a seguito di evaporazione da 100 micron a 10 micron [2]. Cioè il trasferimento dei virioni dalla gocciolina di dieci micron al centimetro cubo che la circonda porta ad una riduzione della concentrazione di circa due miliardi di volte: praticamente la concentrazione virale si azzerava.

Oltre ad una riduzione drastica della concentrazione virale occorre tenere in considerazione anche un altro aspetto che limita ulteriormente il rischio di contagio in caso di completa evaporazione. I virioni, come sora accennato, hanno una dimensione tale da essere caratterizzati da un moto browniano nell'aria ambiente, ovvero disordinato, casuale, tale da disperdere uniformemente i virioni nel volume che li contiene. Supponiamo che un soggetto inali un volume di aria contenente un certo numero di virioni uniformemente diffusi nell'aria. La domanda che occorre porsi a questo punto è: quali e quanti dei virioni inalati con l'aria che respiriamo possono andare in contatto col soggetto ricevente provocandone l'infezione? Solamente quei virioni che, una volta inalati con l'aria, si trovino ad una distanza sufficientemente piccola rispetto alle superfici interne da depositarsi nelle vie aeree del soggetto ricevente. Tutti gli altri virioni, infatti, sono espulsi con l'aria espirata così come avviene, per esempio, per il particolato solido ultra fine, senza contatto con il ricevente. Pertanto, la bassissima concentrazione virale e la tipologia di moto che li contraddistingue fanno sì che la probabilità di contatto attraverso i virioni rilasciati dalle goccioline a seguito di evaporazione sia del tutto trascurabile [2]. Si riporta in figura 7 una schematizzazione grafica.

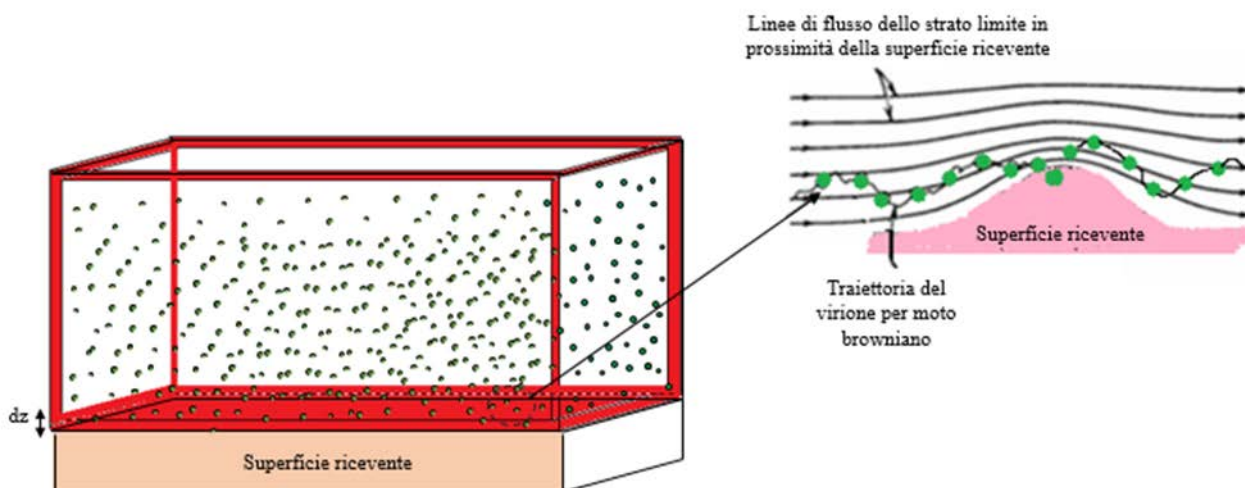


Figura 7. Rappresentazione qualitativa dei virioni (in verde) in moto browniano in prossimità della superficie ricevente. Nella rappresentazione qualitativa solo uno dei virioni che entra in contatto con la superficie ricevente e si deposita su di essa mentre gli altri proseguono nella propria traiettoria. Figura tratta da [2].

A questo punto il meccanismo di diffusione risulta chiaro. Se fossimo in un ambiente saturo, le goccioline con il loro contenuto virale avrebbero tempo e modo di permanere nell'ambiente stesso per tempi molto lunghi, generando la massima condizione di rischio possibile. Pertanto, in queste condizioni, risulta di fatto impossibile definire una distanza di sicurezza, ovvero essa tende all'infinito

quantomeno per le particelle più fini che possono permanere in sospensione nell'ambiente, così come tende all'infinito la permanenza delle particelle più grandi che, terminata la corsa, vengono a contatto con le superfici. Se, invece, ci si trovasse in un ambiente ad umidità controllata, le goccioline più pericolose risultano essere quelle che all'emissione hanno diametro più grande in quanto, a seguito di evaporazione possono raggiungere il soggetto suscettibile con dimensioni inferiori e, quindi, con concentrazioni nettamente maggiori di quelle che avevano all'atto dell'emissione.

Ecco, allora, perché risulta di fondamentale importanza l'utilizzo della mascherina, in particolare in ambiente ad umidità controllata: la mascherina ha la capacità di bloccare con una notevole efficacia le goccioline emesse di dimensioni maggiori, fungendo così da barriera fisica verso l'emissione dei vettori più pericolosi mentre le goccioline di dimensioni più piccole non trattenute dalla mascherina, evaporerebbero completamente in un tempo molto ridotto non rappresentando così un rischio per le persone a distanza di sicurezza. È necessario, a questo punto, identificare il valore della distanza di sicurezza, ovvero la distanza oltre la quale tali goccioline siano evaporate e, quindi, non più in grado di infettare. Al contrario, qualora ci si trovi in ambiente saturo, la mascherina perde di efficacia in riferimento alla riduzione del contagio, in quanto cambia completamente la tipologia di gocciolina che si caratterizza per essere il vettore più efficace del virus.

La strategia di contrasto alla diffusione del SARS-CoV-2 deve allora comprendere:

1. uso della mascherina e o di altre barriere fisiche,
2. controllo del grado igrometrico dell'ambiente,
3. mantenimento della distanza di sicurezza definita in funzione dei parametri ambientali.

I punti 2) e 3) sono strettamente collegati. Infatti, come può essere definita univocamente una distanza di sicurezza se il tempo di sopravvivenza, dunque il percorso fatto, cambia al variare dell'umidità dell'aria ambiente? In assenza della condizione 2, dunque, la condizione 3 non è attuabile in quanto la definizione stessa di un determinato valore della distanza di sicurezza perde di significato.

Ma cosa significa il termine "controllo"? Per spiegarlo si può fare riferimento al mondo degli impianti. Il controllo risulta come conseguenza di una serie di azioni realizzate mediante opportuni dispositivi finalizzati a mantenere la variabile "controllata" al valore desiderato, comunemente definito "set point". Solo garantendo che l'umidità dell'aria ambiente sia mantenuta al valore desiderato si potrà definire una distanza di sicurezza a cui corrisponde una probabilità di contaminazione modestissima.

In riferimento al concetto di controllo, vale la pena evidenziare come l'umidità dell'aria ambiente all'esterno non possa essere controllata, ma dipenda da fattori meteorologici su cui l'uomo ha poca o nessuna capacità di regolazione. Per comprendere il significato di tale affermazione si considerino i due casi seguenti. Immaginiamo di ritrovarci nel periodo tardo autunnale o invernale a conversare ad un tavolino di un bar, all'aperto. Se questa conversazione avvenisse nel tardo pomeriggio o nelle ore serali, guardando alle condizioni tipiche della stagione, può succedere che, con l'abbassarsi della temperatura dopo le 16, ad esempio, l'umidità dell'aria arrivi alla saturazione, come dimostra il velo di condensa che si deposita sulle superfici dei tavolini, sulle sedie, sulle selle delle biciclette e dei motorini, etc. Queste condizioni, come dimostrato, sono ideali per la trasmissione del contagio. Infatti, una volta emesse da un soggetto infetto le goccioline più fini, contaminate, rimanendo in sospensione per tempi molto lunghi, possono percorrere distanze altrettanto lunghe, mentre quelle più grandi, precipitate, per esempio, sul tavolino, depositerebbero il proprio contenuto virale nel velo di condensa formatosi, cioè dove ci sono le condizioni migliori di umidità e temperatura per la sua conservazione. Un gruppo di tavolini occupati da un numero elevato di avventori, posti in ambiente esterno si troverebbe, così, immerso in una nuvola invisibile di goccioline contaminate dal virus, le

quali aumentano all'aumentare del tempo di permanenza del o dei soggetti infetti. In queste condizioni la definizione di una distanza di sicurezza perde ogni significato.

Immaginiamo, al contrario, di ritrovarci nel medesimo periodo ma all'interno di un locale, e con un sistema di condizionamento in grado di controllare l'umidità, ad esempio al 50%. In tali condizioni, come visto, le goccioline evaporerebbero molto più rapidamente, percorrendo una distanza massima che può essere correttamente stimata, al contrario del caso precedente. Pertanto il controllo dell'umidità dell'aria ambiente è l'unico strumento affinché la distanza di sicurezza possa essere effettivamente considerata una barriera rispetto alla diffusione del contagio: una barriera immateriale, in grado però di garantire una modestissima probabilità di contaminazione dei soggetti presenti. Nessuna "nuvola contaminante" si verrebbe ad originare all'interno del locale anche nel caso di permanenza per un tempo più o meno lungo, ed il rispetto della distanza minima di sicurezza così come l'obbligo di indossare la mascherina, nelle circostanze che lo prevedono, avrebbero grande efficacia nel limitare le possibilità di contagio. Pertanto le attività produttive in cui gli esercenti potessero garantire il rispetto della capienza massima, della distanza di sicurezza, il controllo della qualità e, soprattutto, dell'umidità dell'aria nell'intorno del 50%, potrebbero essere realizzate in sicurezza all'interno dei locali ovvero in condizioni di rischio mitigato, temperando, cioè, economia e sicurezza.

In che modo si può controllare l'umidità dell'aria ambiente? Per lo scopo esistono tecnologie dedicate, ampiamente note allo stato dell'arte, la cui implementazione comporterebbe un costo relativamente modesto.

Si consideri a tal scopo il seguente esempio: un'aula di lezione. L'aula ha una superficie calpestabile pari a 100 m². Sono presenti 45 studenti [11]. Ciascun organismo umano, a causa della propria attività metabolica, emette calore e vapore nell'ambiente che lo circonda. Per regolare la temperatura del soggetto, se non è sufficiente lo scambio con la superficie corporea, l'organismo inizia ad emettere sudore che, evaporando, dissipa il calore molto efficacemente. Quindi, il vapore così prodotto aumenta il contenuto di umidità dell'aria presente nell'ambiente.

Sebbene questo fenomeno sia più evidente nello svolgimento di attività fisiche impegnative, l'emissione di vapore dall'organismo all'ambiente in cui questo si trova avviene anche nel caso di attività sedentarie. Quello che cambia è l'intensità del fenomeno, ovvero quanto vapore viene introdotto nell'ambiente per unità di tempo. Nel caso di attività scolastica, si può considerare il dato per attività leggere valido per tutte quelle che si realizzano, ad esempio, all'interno di un ufficio. In particolare, una persona seduta emette (mediamente) una potenza totale pari a 115 Watt per individuo (W/individuo) in condizioni normali. Questa potenza si definisce come somma di due contributi: una potenza sensibile ed una latente. La potenza sensibile, nel caso specifico pari a 70 W/individuo, è quella emessa dall'organismo perché il nostro corpo è a temperatura maggiore di quella ambiente, ed è responsabile dell'aumento della temperatura dell'ambiente stesso in cui si trova (il corpo umano scalda l'ambiente). La potenza latente, invece, nel caso pari a 45 W/individuo, non determina l'aumento di temperatura bensì l'aumento del contenuto di vapore nell'aria ambiente. Tale potenza corrisponde all'emissione di una quantità di vapore oraria pari a circa 65 grammi/individuo.

Con riferimento alla classe con 45 studenti, la potenza latente immessa nell'ambiente risulta pari a 2025 W (più di due chilowatt!), corrispondente all'introduzione di una quantità di vapore nell'ora pari a 2,925 kg/h. In queste condizioni, ipotizzando una umidità di partenza dell'ambiente pari al 70%, in circa mezz'ora si arriva a saturazione, ovvero ad una umidità del 100%.

Ora, non potendo controllare l'umidità dell'aria esterna, aprire semplicemente le finestre (come suggerito dai ricercatori giapponesi) non è garanzia di controllo della diffusione del contagio in quanto l'aria interna potrebbe essere sostituita con aria esterna a maggiore o uguale umidità. Pertanto, anche in questo caso, solo il controllo dell'umidità dell'aria all'interno dell'aula garantisce l'esistenza di un valore della distanza di sicurezza.

Il DM 18.12.1975 (modificato con DM 13.9.1977 e DM 13.12.1977) stabilisce alcuni valori per la salubrità delle aule scolastiche, tra cui temperatura (20°C con tolleranza di 2°C), umidità (grado igrometrico compreso tra 45% e 55%) e ricambi di aria minimi, che per le scuole superiori sono pari a 5. Sarebbe quindi più che sufficiente applicare una legge del 1975 per garantire condizioni di maggiore tutela della sicurezza rispetto alla trasmissione del contagio del SARS-CoV-2.

Poiché la realtà delle aule scolastiche italiane è ben lontana dalla piena applicazione del DM 18.12.1975, almeno per quanto riguarda il controllo della umidità, è necessario prendere coscienza del fatto che è tecnicamente possibile realizzare interventi di miglioramento, anche su edifici esistenti, per rendere possibile il controllo dell'umidità nelle aule scolastiche. Si tratta di installare dispositivi in grado di misurare temperatura e grado di umidità (termoigrometri) dell'aria, assieme a macchine (i deumidificatori) in grado di estrarre l'acqua dall'aria ambiente. Tali dispositivi, reperibili facilmente sul mercato, sono disponibili in varie dimensioni e spesso integrano i due componenti (termoigrometro e deumidificatore) in un unico componente. A titolo di esempio, un deumidificatore portatile in grado di separare sino a 1,25 litri/ora costa circa 250€ e consuma circa 570 W (quindi, considerando 5 ore di lezione, il funzionamento costa circa 60 centesimi di euro al giorno). Si tratta, quindi, di macchine relativamente poco costose, sia in termini di investimento che gestione: per l'esempio fatto in precedenza (aula da 100 m² con 45 persone), tre deumidificatori sarebbero più che sufficienti, con un investimento di 750€ e una stima di costo in bolletta annuo di 360€.

Conclusione.

Il controllo dell'umidità dell'aria negli ambienti confinati è un elemento imprescindibile per contenere la diffusione del contagio del virus SARS-CoV-2. In talune condizioni, quando questo controllo venga effettivamente esercitato, è possibile che l'ambiente interno controllato sia più sicuro di quello esterno. In funzione del valore assunto dall'umidità dell'aria, dipende infatti il tempo che impiega una goccia contaminata, cioè il reale veicolo del contagio diretto, ad evaporare completamente. Tale goccia può viaggiare, oppure depositarsi su una superficie, ma resta un potenziale pericolo fino a che non risulti completamente evaporata.

Per esempio, mentre una goccia di diametro pari a 10 micron evapora in circa 40 millesimi di secondo nel caso di ambiente con umidità pari al 50%, la stessa goccia impiega più di 2 secondi per evaporare in un ambiente con un'umidità del 90%. Nelle condizioni limite, cioè per umidità tendenti al 100%, ovvero in condizioni di saturazione dell'aria ambiente, le goccioline permangono in ambiente per tempi molto lunghi. Questa condizione è dunque la più pericolosa in riferimento alla diffusione del contagio.

L'evaporazione completa della goccia, come si è visto nel presente articolo, è garanzia di una modestissima probabilità di diffusione del contagio. La letteratura scientifica è praticamente unanime nel ritenere che il virus non si trasmetta con modalità cosiddetta *airborne*, ovvero trasportato fluttuando nell'aria, ma solo attraverso le goccioline che lo contengono. In termini pratici, una volta completata l'evaporazione della goccia, i virioni contenuti sono trasferiti all'aria ambiente circostante la gocciolina stessa, facendo sì che la concentrazione virale, praticamente, si azzeri. Inoltre, in conseguenza della propria dimensione, il percorso disordinato e casuale che caratterizza i virioni (moto browniano), fa sì che la probabilità del loro contatto e deposizione con le superfici delle vie respiratorie sia praticamente trascurabile.

Pertanto in assenza di controllo dell'umidità, il concetto stesso di distanza di sicurezza, ovvero la distanza oltre la quale si ha una modestissima probabilità di contaminazione, perde completamente di significato. Infatti, qualora nell'ambiente vi fosse un'elevata umidità, le gocce più piccole permanerebbero, senza evaporare e per tempi relativamente lunghi, in sospensione incrementando notevolmente la probabilità di contagio. In particolare nel caso di saturazione dell'aria ambiente

(umidità pari al 100%) il tempo in cui le gocce più piccole si possono muovere in sospensione in aria tende all'infinito rendendo di fatto privo di significato il concetto stesso di distanza di sicurezza: in nessun punto dell'ambiente confinato è possibile garantire l'assenza di goccioline portatrici di virioni.

Semplificando molto il modello fisico di trasmissione a mezzo di goccioline, possiamo affermare che esistono due gruppi distinti di gocce: quelle "grandi" che vengono trattenute totalmente, o quasi, dalla mascherina (la goccia è trattenuta perché, una volta emessa con una certa velocità, va ad urtare la mascherina rimanendo intrappolata sulla sua superficie: si tratta di un "impatto inerziale", tecnicamente parlando) e quelle "piccole" che, proprio per le modeste dimensioni, e, quindi per la bassa inerzia, sono in grado di sfuggire all'urto con la superficie della mascherina e proseguire il loro percorso fuori da essa, verso l'ambiente circostante, per mezzo dell'aria emessa dal soggetto, che fa da elemento di trasporto. Queste, per essere neutralizzate, una volta sfuggite alla mascherina, devono necessariamente evaporare in tempi sufficientemente brevi da scongiurare il pericolo di contaminazione. Da qui la necessità del controllo dell'umidità dell'aria che garantisce, come mostrato in questo articolo, tempi certi di completa evaporazione, in funzione del diametro iniziale della goccia.

Qualora la mascherina non riesca a bloccare qualche goccia di grandi dimensioni che, poi, per evaporazione riduce la propria dimensione nel tragitto attraverso l'ambiente, ci troveremmo nelle condizioni più critiche. Infatti la goccia, che ridotta di dimensione può percorrere traiettorie più lunghe, nel caso conservasse tutti i virioni che aveva all'atto dell'emissione, riducendo il proprio volume per evaporazione, sarebbe caratterizzata da una concentrazione virale maggiore. È ragionevole ipotizzare che, a parità di risposta del sistema di difesa dell'uomo, una maggior concentrazione possa essere responsabile di conseguenze più severe.

Controllare l'umidità in ambiente esterno, anche in situazioni localizzate, è estremamente difficile se non impossibile. Si pensi al caso di permanenza di pubblico in ambiente esterno, ai tavolini posizionati all'esterno di un bar. In alcuni momenti della giornata, per esempio nelle ore del tardo pomeriggio o della sera, nelle stagioni autunnale ed invernale, alla riduzione della temperatura esterna consegue un consistente aumento del grado igrometrico (solitamente già alto in quelle condizioni) che, pertanto, tende alla saturazione (100% di umidità). Siamo, quindi, in condizione ottimali per la trasmissione delle goccioline potenzialmente cariche di virioni, e, perciò, ad alto rischio di contagio, pur essendo in ambiente esterno.

Controllare l'umidità all'interno dei locali, viceversa, è molto più facile e, certamente, possibile. Esistono sul mercato, infatti, dispositivi facilmente reperibili, integrabili con qualsiasi ambiente confinato e relativamente economici. La probabilità di contagio in caso di permanenza all'interno di un locale con umidità controllata (per esempio al 50%), previo rispetto della distanza di sicurezza (in questo caso correttamente definibile), della capienza massima e della mascherina (ove richiesto) sarebbe così modestissima.

In caso di persone sedute al tavolo (pranzo, cena, caffè, ecc.) il controllo dell'umidità garantirebbe, ancora una volta, l'evaporazione completa delle gocce di dimensioni più piccole dopo un tempo brevissimo dalla loro emissione e, dunque, prima di aver percorso una distanza sufficiente a trasmettere il contagio ad altre persone sedute allo stesso tavolo, mentre le gocce di dimensioni più grandi, che risultano le più pericolose anche per l'aumento della concentrazione virale a seguito dell'evaporazione, si depositerebbero sulla superficie del tavolo prima di aver realizzato un percorso sufficiente alla diffusione del contagio, per poi evaporare a loro volta in tempi relativamente brevi. È utile osservare che, nel caso in cui l'individuo sia seduto, la distanza della bocca (punto di emissione) dalla superficie del tavolino è molto ridotta rispetto alla distanza che si avrebbe nel caso in cui l'individuo rimanesse in piedi.

Pertanto garantire il controllo dell'umidità dell'aria ambiente, il rispetto della capienza massima e della distanza di sicurezza così come l'obbligo di indossare la mascherina nelle circostanze che lo richiedono all'interno dei locali, consentirebbe a coloro che debbono gestire spazi confinati lo svolgimento della propria attività senza incorrere in situazioni di rischio concreto, temperando, cioè, economia e sicurezza.

In conclusione occorre osservare che alcuni dei dati di input utilizzati per il calcolo della distanza di sicurezza, cioè il numero e le dimensioni delle goccioline emesse, derivano dalla letteratura scientifica per casi di studio spesso ben descritti, ma non tengono conto del fatto che questi dati possono essere diversi da individuo a individuo. Questi modelli dovranno essere migliorati mediante, per esempio, analisi statistica su un campione di individui significativo.

Pertanto, il concetto di distanza di sicurezza, più volte utilizzato nel testo, fa riferimento ad una distanza mediamente sicura, ovvero ad un valore medio a cui corrisponde, concettualmente, una probabilità di contaminazione verosimilmente trascurabile.

Bibliografia

1. Zhu, N.; Zhang, D.; Wang, W.; Li, X.; Yang, B.; Song, J.; Zhao, X.; Huang, B.; Shi, W.; Lu, R.; Niu, P.; Zhan, F.; Ma, X.; Wang, D.; Xu, W.; Wu, G.; Gao, G.F.; Tan, W. 2020. *A Novel Coronavirus from Patients with Pneumonia in China, 2019*. The new England Journal of Medicine.
2. Saccani, C.; Fantini, M.P.; Gori, D.; Guzzini, A.; Pellegrini, M.; Re, M.C.; Reno, C.; Roncarati, G.; Vocale, C. 2020 *Analisi della trasmissione di SARS-CoV-2: influenza delle condizioni termoigrometriche rispetto al rischio di diffusione del contagio*, AMS Acta, Bologna.
3. Sito Smart Air. <https://smartairfilters.com/en/blog/can-masks-capture-coronavirus/>. Accessed 14/05/2020
4. Rawlinson, W.D.; Gralton, J.; Tovey, E.; McLaws, M.L. 2011. *The role of particle size in aerosolised pathogen transmission: A review*. Journal of Infection. 62. pp.1-13.
5. Heymann B. 1899. *Ueber die Ausstreuung infectioser Tropfen beim Husten der Phthisiker*. Medical Microbiology and Immunology. 30(1). pp.139-62.
6. Xie, X.; Li, Y.; Sun, H.; Liu, L. 2009. *Exhaled droplets due to talking and coughing*. J R Soc Interface. 6(Suppl 6). pp.S703–S714.
7. Wells. 1934. *On air-borne infection. Study II. Droplets and droplet nuclei*. Am. J. Hyg., 20, pp. 611–618.
8. Kukkonen, J.; Vesala, T.; Kulmala, M. 1989. *The interdependence of evaporating and settling for airborne freely falling droplets*. J. Aerosol Sci. 7. pp.749-763.
9. Xie, X.; Li, Y.; Chwang, A.T.Y.; Ho, P.L.; Seto, W.H. 2007. *How far droplets can move in indoor environments – revisiting the Wells evaporation–falling curve*. Indoor Air. 17. pp.211-225.
10. Sito NHK World-Japan. *Microdroplets pose coronavirus risk*. <https://www3.nhk.or.jp/nhkworld/en/news/ataglance/844/>. Accessed 20/11/2020.
11. Rossi, N. 2013. *Manuale del termotecnico*. Terza edizione. Hoepli Editore.