

[natura](#) > [rapporti scientifici](#) > [articoli](#) > articolo

Scarica il pdf

Articolo | [Accesso libero](#) | [Pubblicato:14 marzo 2023](#)

## Film fotocatalitici adesivi TiO<sub>2</sub>-Ag-NP in grado di disinfettare gli spazi abitativi interni con un approccio semplice

[Salvatore Chirumbolo](#), [Davide Gibellini](#), [Luca Berto](#), [Cinzia Cirrito](#), [Antonio Velella](#), [Geir Bjorklund](#), [Andrea Sbarbati](#), [Paolo Bernardi](#) & [Umberto Tirelli](#)

[Rapporti scientifici](#) **13**, Numero articolo: 4200 (2023)

**597** Accessi | **1** altimetria | [Metrica](#)

### Astratto

Sono state utilizzate pellicole fotocatalitiche adesive nanoparticellari (TiO<sub>2</sub>-Ag-NP) drogate con TiO<sub>2</sub>-Ag per valutare la capacità di abbattere il carico di particelle microbiche interne. L'applicazione di una pellicola adesiva fotocatalitica di facile utilizzo per ripulire gli spazi abitativi indoor dall'inquinamento microbico, rappresenta una novità nel campo dei dispositivi fotocatalitici. La riduzione è stata ottenuta mediante fotocatalisi in spazi selezionati, di solito con sovraffollamento ( $\geq 3$  individui) nelle comuni ore lavorative giornaliere, e dopo monitoraggio del microclima interno. Nanoparticolato drogato con TiO<sub>2</sub>-Ag (TiO<sub>2</sub>-Ag-NP) pellicole fotocatalitiche adesive sono state applicate all'interno di cinque tipi di spazi abitativi, tra cui scuole e luoghi di lavoro. L'inquinamento microbico è stato valutato al tempo 0 (lontano dalla pulizia di routine,  $\geq 9$  h) e durante le 2-4 settimane successive all'applicazione del fotocatalizzatore mediante luminometria dell'unità di luce relativa (RLU) e valutazione microbica indiretta (unità formanti colonie per metro cubo, CFU/m<sup>3</sup>). Il fotocatalizzatore TiO<sub>2</sub>-Ag-NP ha ridotto RLU e CFU/m<sup>3</sup> di percentuali superiori al 70%, portando a RLU  $\leq 20$  e presenza microbica  $\leq 35$  CFU/m<sup>3</sup>. Il TiO<sub>2</sub>-Ag-NP descritto è in grado di ridurre l'inquinamento microbico alla soglia RLU più bassa ( $\leq 20$ ) entro 60 minuti alla luce del giorno in una sala prove standardizzata di 100 m<sup>2</sup>. La correlazione tra RLU e CFU/m<sup>3</sup> è stata positiva ( $r = 0,5545$ ,  $p < 0,05$ ), valutando che la riduzione microbica delle aree interne da parte del film adesivo TiO<sub>2</sub>-Ag-NP era reale. I fotocatalizzatori Titania rappresentano strumenti promettenti per garantire la pulizia e la sanificazione dell'aria nei microclimi interni viventi con un approccio a basso costo, fattibile e semplice. Questo approccio rappresenta un approccio facile da gestire, conveniente, fattibile ed efficace per ridurre l'inquinamento microbico negli

spazi interni, semplicemente attaccando una pellicola adesiva TiO<sub>2</sub>-Ag-NP sulla parete.

## introduzione

L'utilizzo del biossido di titanio con film sottili nanoparticellari di Ag (TiO<sub>2</sub>-Ag-NP) come catalizzatore foto-ossidativo per la rimozione di inquinanti chimici o contaminazioni microbiche, risale a pochi decenni fa, quando questo approccio era apprezzato per la sua economicità, massima tasso di ossidazione a temperatura ambiente, elevate velocità del condotto e bassa tolleranza di caduta di pressione [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#).

Diversi tipi di tecnologie a film sottile, come lo spin coating [7](#), l'evaporazione con raggio elettronico, la deposizione chimica da vapore [8](#) o lo sputtering di magnetron [9](#), sono in grado di costruire un film sottile composto di elementi TiO<sub>2</sub> (100 nm) uniti e/o complessati con nanoparticelle di argento (Ag) (solitamente ≤ 10 nm, intervallo 1–100 nm), tramite vari metodi, come il drogaggio [10](#), [11](#), la formazione di eterogiunzioni [12](#) o l'impianto di ioni metallici o altri [13](#). Il componente TiO<sub>2</sub> funziona come un semiconduttore, avendo un gap energetico (EG) = 3–3,3 eV, nonostante questo valore dipenda dalle diverse forme allotropiche di titania. Quando TiO<sub>2</sub> viene irradiato con fotoni di quantità di energia maggiore di EG (cioè corrispondente ad una lunghezza d'onda, λ ≤ 390 nm), allora un elettrone è in grado di superare questo gap energetico e può essere promosso dalla banda di valenza a quella di conduzione di carica. Il gap di valenza è in grado di reagire con le molecole d'acqua assorbite sul film sottile del fotocatalizzatore, formando dei radicali derivati dall'ossigeno, come il radicale idrossile (·OH<sup>-</sup>), che sono in grado di danneggiare gravemente le cellule batteriche o direttamente su eventuali composti organici adsorbiti. Quindi, il film fotocatalitico su un supporto adesivo [14](#), [15](#), è in grado di convertire le specie reattive dell'ossigeno (ROS) in perossido di idrogeno, che viene utilizzato da Ag per migliorare l'uccisione batterica [16](#).

Ad oggi, l'applicazione diffusa di dispositivi che utilizzano la nanotecnologia TiO<sub>2</sub>-Ag è in rapida crescita, sia negli spazi interni pubblici che nelle strutture domestiche, a causa di un crescente riconoscimento verso la capacità TiO<sub>2</sub>-Ag-NP di ridurre la contaminazione microbica indoor e lasciare un ambiente privo di microbi [17](#), [18](#), [19](#). L'uso di pellicole fotocatalitiche TiO<sub>2</sub>-Ag-NP recentemente brevettate [19](#), [20](#), che possono essere facilmente applicate a pareti o finestre al fine di esercitare una rimozione fine dell'inquinamento microbico aereo, sta attirando l'interesse del pubblico a causa del relativo basso costo, facilità di manipolazione e bassa tossicità del TiO<sub>2</sub> fotocatalisi mediata [20](#). Abbiamo recentemente dimostrato che questi dispositivi fotocatalitici (sottili pellicole adesive) facili da maneggiare erano in grado di far cadere gli inquinanti microbici negli spazi interni dei veicoli pubblici, solitamente sovraffollati di alunni, studenti o clienti [20](#). Questo studio rappresenta un'ulteriore valutazione della nostra ricerca sugli spazi abitativi interni.

In realtà, le prove qui descritte rappresentano una novità nel campo dei materiali fotocatalitici utilizzati per pulire gli ambienti interni dalle particelle microbiche trasportate dall'aria. Nonostante l'utilizzo della fotocatalisi del TiO<sub>2</sub> per ambienti indoor risalga agli anni novanta, tuttavia per quanto riguarda l'inquinamento chimico (composti organici volatili), scarsa attenzione viene dedicata all'utilizzo del TiO<sub>2</sub>-Ag-NP per ridurre la contaminazione microbica in un ambiente abitativo indoor, come gli inquinanti chimici rappresentano ancora i principali obiettivi dell'applicazione della fotocatalisi [1](#), [21](#). La sfida tecnologica è quella di progettare un fotocatalizzatore maneggevole da applicare in qualsiasi spazio interno in maniera eco-sostenibile. La capacità delle nostre pellicole adesive fotocatalitiche di pulire gli spazi interni umani è fondamentale se i dispositivi sono particolarmente facili da maneggiare, convenienti, resistenti e altamente efficaci nel ridurre l'inquinamento microbico e chimico in uno spazio abitativo, come scuole o luoghi di lavoro, in modo ampiamente fattibile. La pellicola fotocatalitica qui descritta è molto facile da applicare in ambienti interni per ridurre l'inquinamento microbico aereo, funziona una volta semplicemente incollando la pellicola adesiva su superfici illuminate verticali interne.

Inoltre, il recente studio di Matura e colleghi, confermato da altri, ha valutato che la fotocatalisi mediata da TiO<sub>2</sub>, ovvero una pellicola di vetro rivestita con fotocatalizzatore di biossido di titanio, ha mostrato la capacità di inattivare entro 20 min il 99,9% di SARS-CoV 2 in aerosol, distruggendo le particelle virali e i loro genomi [19](#), [22](#), [23](#). La capacità dei fotocatalizzatori di titanio di esercitare un'azione sanificante nei climi indoor è ampiamente nota e di particolare attualità.

In realtà, la fotocatalisi con materiali in biossido di titanio sta emergendo come una nuova e semplice tecnologia per ridurre la contaminazione microbica negli ambienti interni [20](#), [24](#). L'interesse per la cosiddetta disinfezione fotocatalitica è arrivato ad un incremento esponenziale negli ultimi anni, superando le 800 segnalazioni sul campo [24](#), probabilmente a causa di un netto miglioramento delle numerose tecnologie fotocatalitiche per la sanificazione indoor [20](#), [24](#), [25](#), [26](#). Alcuni ambienti interni sono particolarmente cruciali per i problemi di sicurezza. Oltre alle strutture sanitarie e agli hospice, le scuole e gli istituti scolastici, solitamente affollati di bambini, rappresentano un elemento fondamentale per garantire uno spazio abitativo sicuro, in quanto anche i bambini e gli adolescenti sono considerati soggetti a rischio [28](#), [29](#), [30](#). Lo stesso può essere tenuto per i lavoratori giornalieri, per garantire una vita interna sana e ridurre gli infortuni sul lavoro.

In questo contesto, la capacità del nostro fotocatalizzatore TiO<sub>2</sub>-Ag-NP di ridurre le particelle microbiche in un ambiente interno può essere considerata un importante progresso tecnologico.

Lo scopo di questo studio di ricerca è valutare la capacità di una semplice nanotecnologia fotocatalitica TiO<sub>2</sub>-Ag-NP ad alta tecnologia, disposta in un semplice film adesivo, di ridurre drasticamente il contenuto microbico aerodisperso negli ambienti interni, in modo da generare un ambiente pulito, spazio disinfettato e salubre in cui stabilmente vivere, studiare o lavorare.

## Metodi

### Selezione degli spazi interni e valutazione del microambiente

[I principali criteri di](#) ammissibilità

per la selezione degli [spazi nel](#) nostro studio [facevano](#) riferimento a rapporti [pubblicati in precedenza](#) al fine di valutare un microclima abbastanza [costante nei](#) nostri [ambienti](#) interni [33](#), [35](#), in modo da ridurre significativamente l'impatto di valori anomali, bias e confondenti nei dati raccolti. Per estendere la nostra indagine alla più ampia tipologia di spazi interni sottoposti alla nostra tecnologia fotocatalitica, abbiamo selezionato: (a) quattro diverse aule scolastiche (raccolta dati dal 25 maggio 2021 al 7 giugno 2021); (b) uno showroom aziendale (raccolta dati dal 14 aprile 2021 al 14 giugno 2021); (c) due diversi box aziendali (job container) (raccolta dati dal 29 aprile 2021 al 13 maggio 2021); (d) un deposito di lavanderia in una lavanderia (raccolta dati dall'11 giugno 2021 al 16 giugno 2021); (e) un negozio di telefonia (raccolta dati dal 16 settembre 2021 al 12 novembre 2021). Applicazioni di due tipi dimensionali WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP, ovvero Tipo-1 (0,6 m × 0,9 m, = 0,54 m<sup>2</sup>) e Tipo-2 (0,3 m × 0,5 m, = 0,15 m<sup>2</sup>), sono stati applicati all'interno degli spazi interni, avendo cura di non utilizzare un solo film fotocatalitico e consentire un'ampia diffusione di più film disponibili per rilevare in modo omogeneo tutto l'ambiente interno. A causa delle diverse condizioni macroambientali (il rapporto dell'edificio con i parametri climatici esterni) è stato difficile standardizzare un numero esatto di film WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP, pertanto, sulla base dell'esperienza precedente [20](#), abbiamo predisposto il pellicole fotocatalitiche come segue. Ogni aula scolastica misurava 6 m di larghezza × 10 m di lunghezza × 5 m di altezza (60 m<sup>2</sup>) ed era dotata di un totale di 1,62 m<sup>2</sup> WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP n. 3 pellicole fotocatalitiche adesive di tipo 1. Lo showroom aziendale misurava 10 m di lunghezza × 10 m di larghezza × 3,5 m di altezza (100 m<sup>2</sup>) ed era dotato di un totale di 2,16 m<sup>2</sup> WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP n. 4 Pellicola fotocatalitica adesiva di tipo 1. Ogni box di allevamento era di 19,95 m<sup>2</sup> e 69,85 m<sup>3</sup> (WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP n.4 pellicola fotocatalitica adesiva di tipo 2 = 0,6 m<sup>2</sup>). Il deposito della lavanderia era di 12 m<sup>2</sup> (42 m<sup>3</sup>), mentre il negozio di telefoni era di 60 m<sup>2</sup> (300 m<sup>3</sup>). Film fotocatalitici adesivi WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP = 0,6 m<sup>2</sup> e 1,62 m<sup>2</sup> sono stati rispettivamente applicati.

La valutazione del microclima in questi diversi spazi interni non è stata significativamente influenzata dai diversi periodi stagionali per raccogliere dati grezzi, in quanto i campioni sono stati raccolti prevenendo differenze transitorie di microclima tra ambienti interni ed esterni, al fine di impostare la differenza termica dell'aria ambiente e la differenza di umidità relativa sufficientemente piccola da assomigliare a uno stato stazionario (differenza nell'indice termico universale, ΔUTCI, ≤ 0,5 °C) [34](#). I criteri di ammissibilità del clima interno per l'inclusione dei dati nello

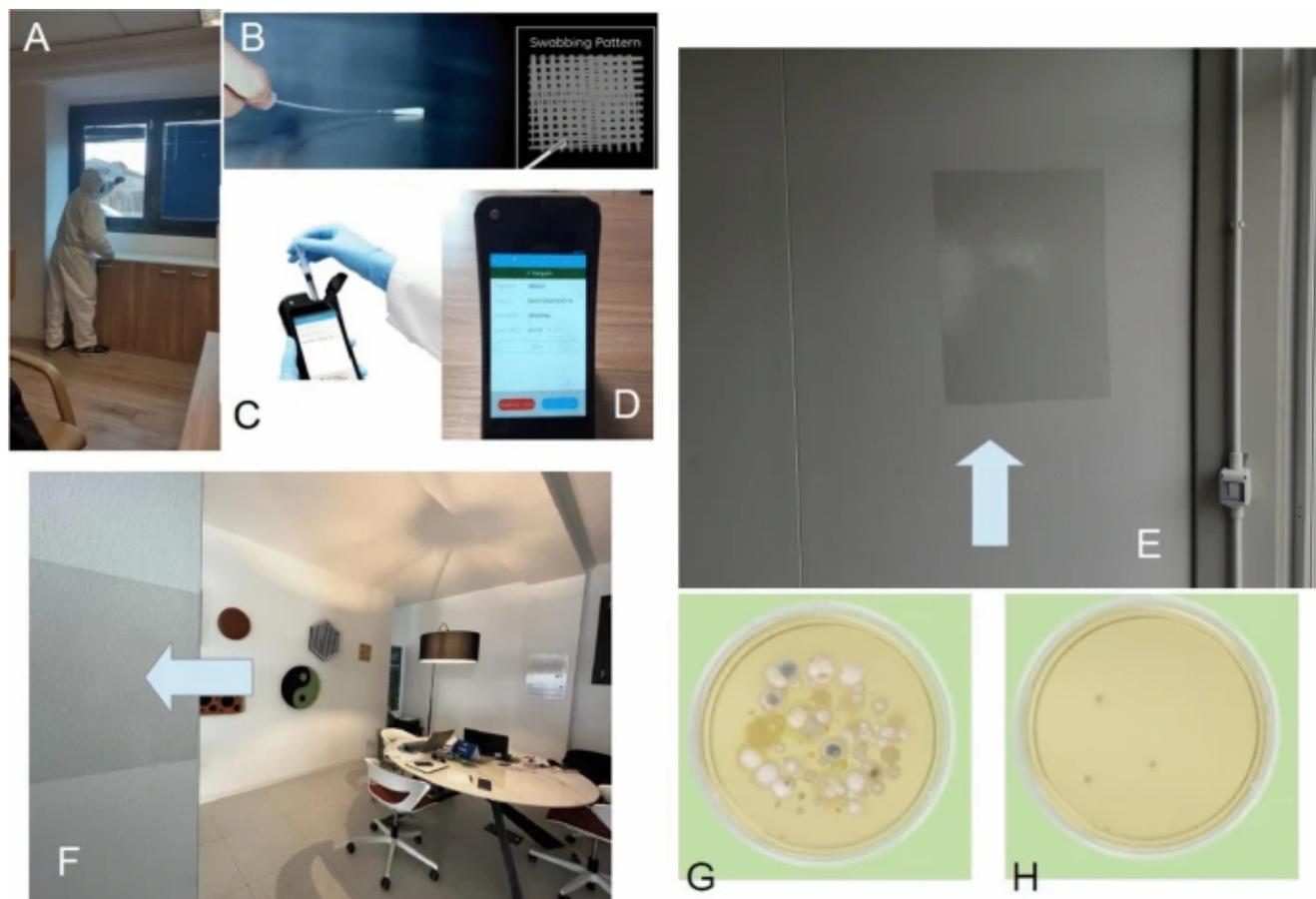
studio erano: a) intervallo di temperatura 21–26°C (69,8–78,8 °F), umidità relativa (RH) 40–60%, CO<sub>2</sub> tra 250 e 1000 ppm; PM<sub>2,5</sub> ≤ 12 µg/ m<sup>3</sup>, ventilazione e comfort termico secondo la norma europea EN 16.798:2019 e ulteriori valutazioni [35](#), esposizione alla luce come descritto più avanti.

Campionamento, trattamento TiO<sub>2</sub>-Ag-NP e gestione dei dati

I campioni sono stati raccolti con metodi a tampone [36](#). Ogni tampone è stato eseguito lontano dalle impostazioni di pulizia di routine (≥ 9 h dalla pulizia chimica) da un nostro (Luca Berto) insieme a un assistente (Antonio Vella).

La Figura [1](#) riassume il processo di campionamento con il metodo del tampone.

**Figura 1**



Breve riepilogo del processo di test del tampone per le prestazioni RLU. ( **A** ) Il coautore LB mentre tampona sulla parte interna di una superficie verticale (il vetro di una finestra, per esempio), ( **B** ) Modo con cui il tampone deve essere maneggiato e utilizzato sulla superficie; ( **C** ) Inserimento del tampone nel dispositivo di rilevamento RLU; ( **D** ) un esempio di lettura RLU; ( **E** ) e ( **F** ) Diversi esempi dell'applicazione WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP (un job container e un ufficio); ( **G** ) Risultati microbiologici su piastra TSA (37 °C, 48 h) prima e ( **H** ) dopo l'applicazione per 12 h del film adesivo WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP.

Inizialmente, l'operatore lascia che il tampone UltraSnap sia equilibrato a temperatura ambiente (circa 21–25 °C) prima di qualsiasi utilizzo previsto, quindi tiene saldamente il tampone e, ruotando ed estraendo la parte superiore del tampone dal suo tubo, lo prepara a usalo. Successivamente, tampona accuratamente un'area standard (Fig. 1 A) seguendo le istruzioni del produttore e tamponando un'area di 4 × 4 pollici o 10 × 10 cm, seguendo un percorso a zig zag (Fig. 1B). Le aree (superfici) sono solitamente parti interne di finestre (vetro) o oggetti interni lontani dal contatto umano. L'operatore riposiziona il tampone nel tubetto del tampone, quindi usa il pollice e l'indice per rompere la valvola a scatto, tenendo saldamente il tubetto e piegando il bulbo avanti e indietro per alcuni secondi. Quindi schiaccia il bulbo almeno due volte per consentire l'espulsione del liquido lungo l'asta del tampone, agita la gemma del tampone nel liquido per 5-10 s e poi leggerà il campione nel bioluminometro (Fig. 1 C) entro 30 s, tenendo il luminometro in posizione verticale. Quindi preme il pulsante di avviamento e leggerà il valore RLU (Fig. 1 D).

Il campionamento è stato eseguito in quadruplicato, ovvero per ogni sito valutato sono stati eseguiti almeno 4 tamponi nella stessa raccolta di campionamento (ogni campione = 4 tamponi) e tutti eseguiti a partire dalle 15:00 ± 15 min, lontano dall'orario di pulizia di routine (6:00). Ogni tampone è stato effettuato in uno spazio vuoto senza persone, ad eccezione degli esecutori del test, dove è stata indotta la completa assenza di affollamento di persone almeno 30 min prima della raccolta, al fine di standardizzare i parametri del clima interno e prevenire confondenti statistici. Ogni spazio interno testato è stato dotato di un semplice tipo di pellicola fotocatalitica WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP, fissata su diverse pareti, su un telaio di supporto o direttamente, 20 ore prima del campionamento. Il TiO<sub>2</sub> fotocatalizzatore -Ag-NP è un foglio adesivo con due tipologie dimensionali, come sopra riportato: (a) un foglio di Tipo-1 (60 × 90 cm) (utilizzato per esperimenti nelle scuole e negli ambienti interni di lavoro), (b) un foglio di Tipo- Telo da 2 (30 × 50) cm nelle cabine di stabulazione agricola. Ciascun fotocatalizzatore, presentandosi come un pannello adesivo sulla parete, è stato posto ad una distanza dal centro della stanza ≤ 3,00 m, dal pavimento ≥ 1,5 m, dalla sommità ≥ 1,0 m. Il fotocatalizzatore è stato lasciato al suo posto per tutto il tempo sperimentale.

Il campionamento è stato effettuato alle ore 15:00 del giorno precedente l'esperimento e prima di attaccare il film fotocatalitico WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP (campioni di controllo) e nel giorno/giorni dell'esperimento, con il film fotocatalitico WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP precedentemente attaccato film (campioni di dati). Il numero di dati di campionamento per ciascuna area interna indagata è stato calcolato mediante statistiche sulla dimensione del campione al fine di ottenere un margine di errore vicino al 5%. Pertanto, un numero di almeno 70 campioni è stato considerato sufficiente per raggiungere il 95% di una proporzione di popolazione sottoposta all'effetto con un intervallo di confidenza del 95% (errore = 5,11%). I dati dal tempo 0

e dalla fine della raccolta dei dati sono stati elaborati in modo indipendente. Il Cohen k per l'accordo (89,74%) era 0,6533.

I punti di campionamento sono stati progettati in modo da includere almeno quattro sottoaree interne e otto opzioni di campionamento, a seconda del rationale dello studio, dalla sorgente del fotocatalizzatore e dalla ventilazione, entro 1,5 m (vicino), ovvero vicino/lontano dal fotocatalizzatore, vicino/ lontano una finestra o una porta, vicino/lontano il centro di una stanza, vicino/lontano le pareti di una stanza. Poiché i dati riguardavano il volume interno complessivo della stanza indagata, gli spot non differivano significativamente tra loro, mentre i valori anomali ( $\geq 3$  DS) sono stati rimossi dalla gestione dei dati finali.

#### Tampone per valutazione luminometrica e calcolo RLU

La valutazione dell'adenosina trifosfato (ATP) è stata effettuata esclusivamente da personale addestrato.

Una superficie di circa 100 cm<sup>2</sup> (10 × 10 cm) è stata accuratamente tamponata usando un tampone ATP seguendo due direzioni opposte. Qualsiasi campionamento ATP è stato eseguito con tamponi ATP forniti dal produttore (Ultrasnap-ATP monitoraggio Hygiene). I campioni sono stati tutti indifferentemente eseguiti mentre lo spazio interno era illuminato dalla luce solare diurna, in un range compreso tra 1000 lx, che tipicamente identifica una giornata nuvolosa a mezzogiorno, e 120.000 lx (luce solare più intensa) alla stessa ora (15:00 ± 15 min), a seconda della stagionalità locale e/o del tempo, ad eccezione degli esperimenti sulle prestazioni del fotocatalizzatore (vedi sotto). In precedenza abbiamo dimostrato che la proprietà fotocatalitica del WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP non cambiava in modo significativo con diverse sorgenti luminose [20](#).

Dopo il campionamento, i tamponi sono stati inseriti in un bioluminometro manuale calibrato e automatico (ENSURE Touch, modello HYGIENA Ultrasnap), in grado di fornire un output immediato e tempestivo in Unità di Luce Relativa (RLU), solitamente entro 15 s e con una sensibilità fino a 0,1 femtomoli di ATP per campione. Il dispositivo è calibrato per fornire come controllo positivo l'intervallo di calibrazione della luce β 270–330 RLU e un controllo negativo sullo sfondo (bianco) di 0–5 RLU. La quantità di luce emessa dalla sonda luminescente è espressa come RLU rispetto ad uno standard calibrato ed è linearmente dose-dipendente dalla concentrazione di ATP microbico [37](#).

Valori di penetrazione RLU < 20 indicavano una superficie pulita, mentre valori  $\geq 60$  RLU rappresentavano una soglia minima di sporco, cioè valutando una superficie non pulita dopo almeno un'ora di contatto diretto con l'uomo. Pertanto, una riduzione

target di RLU  $\leq 20$  RLU o del 70% rispetto al controllo rappresentava il nostro endpoint primario.

Valutazione delle prestazioni del film adesivo fotocatalitico WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP

Per valutare le prestazioni del film adesivo WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP in diversi contesti di fotocatalisi è stato anche preso in considerazione un esperimento RLU separato, che coinvolge sei diverse condizioni di luminosità interna: (a) luce solare diretta ( $30\text{--}100 \times 10^3$  lx); (b) luce diurna ambientale ( $10\text{--}25 \times 10^3$  lx); (c) tramonto o alba (tipicamente 400–50 lx); (d) luce diurna con cielo coperto (1.000 lx); (e) luce ambiente interna 1 (750 lx); (f) luce ambiente interna 2 (250 lx). La luminosità interna è stata misurata con un luxmetro PCE-VDL 16I (PCE Instruments, GmbH, Germania) e riportata in lux. WIWELL TiO<sub>2</sub> film adesivi -Ag-NP (4 film di tipo 1) sono stati applicati all'interno dello spazio interno almeno 24 ore prima dell'inizio del test. Nessuna pulizia chimica è stata eseguita nelle 24 ore precedenti e durante la corsa sperimentale. Ciascuna delle sei diverse condizioni è stata eseguita in sei giorni diversi. Il tampone è stato eseguito nello stesso ambiente interno di prova (una stanza isolata termicamente  $10 \times 10 \times 3,5$  m,  $100 \text{ m}^2$ ,  $350 \text{ m}^3$ , 55–60% di umidità relativa, 0,07–0,25 m/sec di ventilazione interna) su 5 diversi punti del tampone in duplicato ogni 10 min a 1 h e a 90, 120, 150, 180 e 240 min. Il test è stato eseguito da due operatori (LB, AV), al fine di organizzare e gestire correttamente il test del tempo, secondo la valutazione RLU descritta in precedenza.

Conteggio microbico diffuso nell'aria indoor in unità formanti colonie per metro cubo (CFU/m<sup>3</sup>)

Al fine di verificare le condizioni ambientali di bioinquinanti aerodispersi, quali batteri o funghi, è stato effettuato il campionamento dell'aria utilizzando uno specifico strumento campionario portatile per il controllo microbiologico (MICROFLOW ALPHA, Aquaria, Italia), secondo UNI-EN ISO 14.698: 2003, EN 17,141:2020 e metodo UNICHEM 1962–2 [38](#), [39](#). Lo strumento consente un controllo di autocalibrazione, tramite il sistema di calibrazione automatica sviluppato dal Politecnico di Milano (Italia) (rapporto n.377/2003) e certificato dall'INRIM di Torino (Certificato n.10-0114-01/2010).

Per l'analisi microbiologica di routine, un modello di testa da 90 mm (380 fori filtranti da 1 mm) è stato caricato con piastre di coltura ICRplus Tryptic Soy Agar (TSA) più lecitin-tween 80-istidina e tiosolfato (TSA + LTHTh) da 90 mm (Merck -Millipore, Darmstadt, Germania) per ciascun test, al fine di indagare la presenza nell'ambiente di microbi ambientali indoor. Le piastre hanno permesso di incubare batteri aerobi, microaerofili e anaerobi. Per indagare anche la presenza di lieviti e muffe è stato utilizzato un terreno di coltura Sabouraud Dextrose Contact Agar + LTHTh in almeno quattro diverse occasioni.

Un campione di volume totale di 200 L (100 L/min per 2 min) è stato catturato e filtrato dal dispositivo e analizzato secondo metodi precedentemente pubblicati [40](#). Le piastre sono state incubate a 35°C per 24 ore (batteri) e 48 ore (lieviti e muffe). Inoltre, per valutare l'impatto delle dimensioni dei microbi per le aree respiratorie, è stato utilizzato un TCR TECORA Pollution Check IMP-6 Bio (dimensionamento delle particelle aerodinamiche a 6 stadi) in un ambiente di 100 m<sup>2</sup> sala prove con flusso di campionamento di 28,3 L/min. Lo strumento era dotato di piastre TSA da 90 mm. Il microbiologo ha valutato la presenza di diversi microbi secondo almeno sei diversi stadi decrescenti, basati su dimensioni microbiche note: (1) > 7,0 µm; (2) da 7,0 a 4,7 µm; (3) da 4,7 a 3,3 µm; (4) da 3,3 a 2,1 µm; (5) da 2,1 a 1,1 µm; (6) da 1,1 a 0,65 micron. Gli stadi riflettono la posizione di deposito dei batteri inalabili nei polmoni umani, dove 1-2 rappresenta complessivamente i batteri delle vie aeree superiori e 3-6 le particelle microbiche respirabili [40](#), [41](#). Il prelievo è stato eseguito nella cosiddetta zona di respirazione umana, considerata a 1,5 m dal pavimento e a 1,0 m dalle pareti. I microbi sono stati contati come unità formanti colonie per metro cubo (CFU/m<sup>3</sup>) come carica microbica mesofila a 36 °C, secondo il metodo standardizzato ISO 4833-1: 2013, ISO 13.138:2012 [40](#). È stato eseguito anche il campionamento della sedimentazione statica su piastre di agar statico con conta su piastra e destrosio di patata (PD).

### Biomateriale film TiO<sub>2</sub>-Ag-NP e profilo tossicologico

Il film adesivo TiO<sub>2</sub>-Ag-NP è prodotto da WIWELL, Polcenigo (PN, Italia) ed è costituito da una miscela del fotocatalizzatore biossido di titanio (TiO<sub>2</sub>), drogato con nanoparticelle di Ag (WIWELL), su un adesivo polivinil-elastomerico film (WIGLASS), con diverse dimensioni del produttore, tuttavia il rapporto ottimale [area interna/superficie TiO<sub>2</sub>-Ag-NP] dovrebbe essere ≥ 40 (ad esempio, un film di 1,5 m<sup>2</sup> TiO<sub>2</sub>-Ag-NP per una stanza di 60 m<sup>2</sup>, circa, considerando un'altezza media di 2,5-3,0 m).

Il materiale è considerato sicuro, dal punto di vista tossicologico. Nonostante alcuni rapporti controversi [42](#), [43](#), pochi dati sulla tossicologia dei fotocatalizzatori di titanio hanno mostrato che il TiO<sub>2</sub> può essere neurotossico a 2,5 mg/kg di peso corporeo (TiO<sub>2</sub> sfuso) negli animali da esperimento [44](#), tuttavia il TiO<sub>2</sub> EC<sub>50</sub> è di circa 5,83 mg/L [45](#) ed inoltre i test tossicologici eseguiti su *S. cerevisiae* non hanno riportato alcuna azione tossicologica anche a 20.000 mg/L [46](#), valori che dovrebbero garantire l'eventuale impatto tossicologico di una possibile fuoriuscita di titanio dal nanoparticolato WIWELL [20](#).

Per quanto riguarda la tossicità delle nanoparticelle d'argento (Ag-NPs) nella membrana fotocatalitica, l'EC<sub>50</sub> calcolato è 2,0 µg/L per Ag-NP ≤ 5 nm [47](#) e, come percentuale di dissoluzione degli ioni Ag, è stato riportato ≤ 0,26% (cioè 0,13-0,26%) [48](#), considerando che Ag è dallo 0,72 al 6,75% in peso del fotocatalizzatore, la

perdita di Ag da una membrana WIWELL dovrebbe essere approssimativamente  $\leq 1,0 \mu\text{g/L}$  [49](#).

L'efficienza ottimale dell'azione fotocatalitica del TiO<sub>2</sub>-Ag-NP (> 99%) può essere raggiunta a una luminosità superiore a 109.000 lx sotto la luce diretta del sole, cioè durante l'esposizione alla luce solare più intensa (120.000 lx) o alla luce solare intensa (111.000 lx) ma l'effettiva efficienza di qualsiasi rimozione batterica (> 99,99%) si ottiene semplicemente con 90 minuti di attivazione a 2000 lx, quindi anche durante un mezzogiorno completamente coperto, poiché oltre il 90% dei raggi UV-A può passare attraverso nuvole e finestre di vetro [20](#).

### Imaging ottico e SEM del film fotocatalitico TiO<sub>2</sub>-Ag-NP

L'imaging ottico è stato ottenuto con un microscopio ottico Olympus BX51. Campioni molto piccoli 9 × 9 mm (spessore di 2-3 mm) del film fotocatalitico sono stati fissati su mozziconi di alluminio dotati di carbonio appiccicoso, quindi spruzzati con uno strato ultrasottile di oro colloidale e osservati con un microscopio elettronico a scansione ambientale (ESEM) (ESEM XL 30 FEI Philips basso vuoto).

### Statistiche

I dati sono stati raccolti come media  $\pm$  deviazione standard (SD) o mediane. Questi ultimi sono stati valutati anche nella loro distribuzione mediante un Mood's test e un Sign test, a  $p < 0.05$ . Il test della dimensione del campione e Cohen k sono stati considerati per le statistiche del campione. La distribuzione dei dati e la normalità sono state valutate con un test (Kolmogorov-Smirnov (KS) e un test di Lilliefors. È stata eseguita la correlazione di Pearson a  $p < 0,05$ . L'analisi della varianza con un test t accoppiato a due code è stata eseguita nell'ordine per analizzare i dati. Le statistiche sono state calcolate con un software SPSS v 24 e tracciate con il software Smart Statistics v.11.

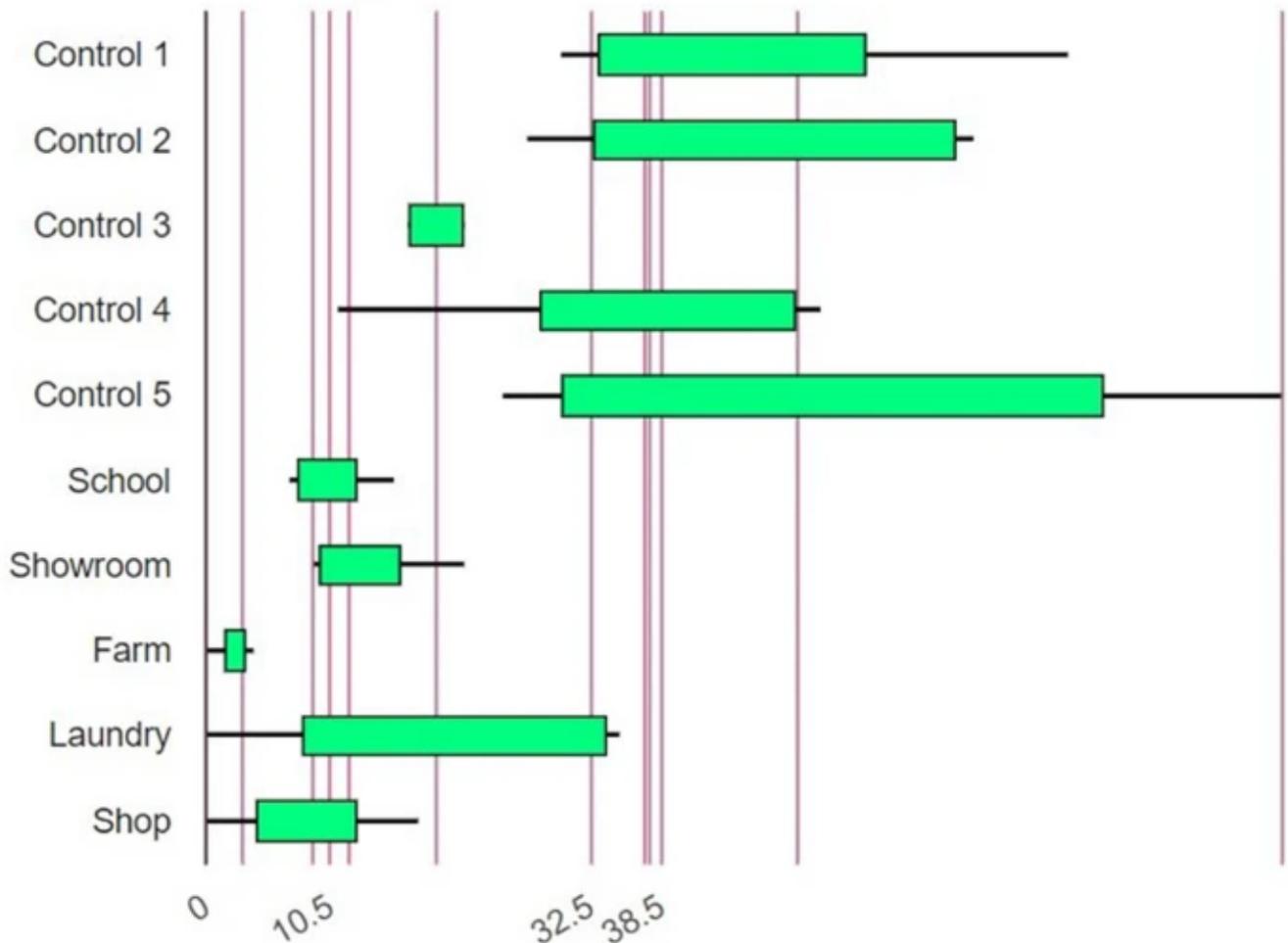
## Risultati

### Riduzione di RLU

La Figura [2](#) mostra che i fotocatalizzatori WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP sono in grado di ridurre significativamente le Unità di Luce Relativa (RLU) valutate in diversi punti di campionamento (repliche quadruplicate) all'interno di 5 diversi spazi interni rispetto ai controlli. La tabella [1](#) mostra il test del segno a due code per ciascuna statistica mediana:

### figura 2

## Box plots of RLU indoor reductions (\*)



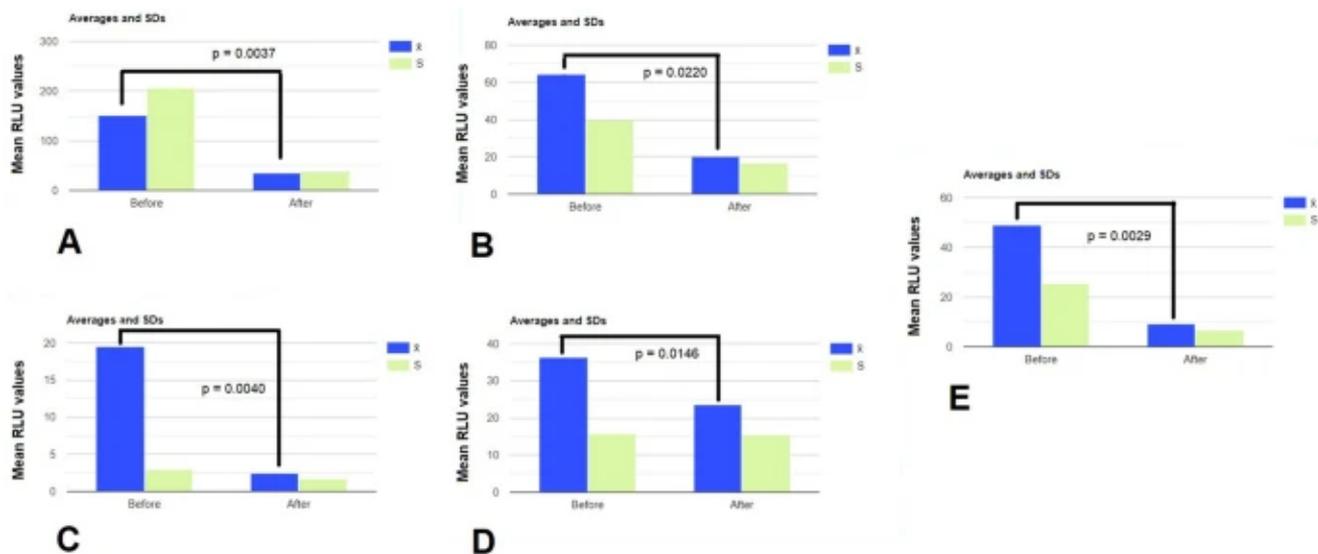
(\*) corrected for outliers

Box plot con medie e mediane (limiti con intervallo di confidenza al 95%) dei valori RLU per i controlli (valutazioni prima dell'applicazione del TiO<sub>2</sub>-Ag-NP) e dati mediati e stimati alla fine della raccolta. Vedere il testo per i dettagli.

### Tabella 1 Test mediano per i dati riportati in Fig. 1

La capacità di TiO<sub>2</sub>-Ag-NP, di ridurre la contaminazione microbica valutata da RLU, è stata segnalata in modo significativo per la maggior parte degli spazi interni valutati, ad eccezione delle lavanderie ( $p > 0,05$ ), dove è ampiamente noto che le operazioni di *lavaggio* possono rappresentare una fonte significativa di trasferimento microbico [50](#).

La Figura [3](#) mostra la riduzione di RLU per ogni singolo ambiente interno selezionato per lo studio.

**Figura 3**

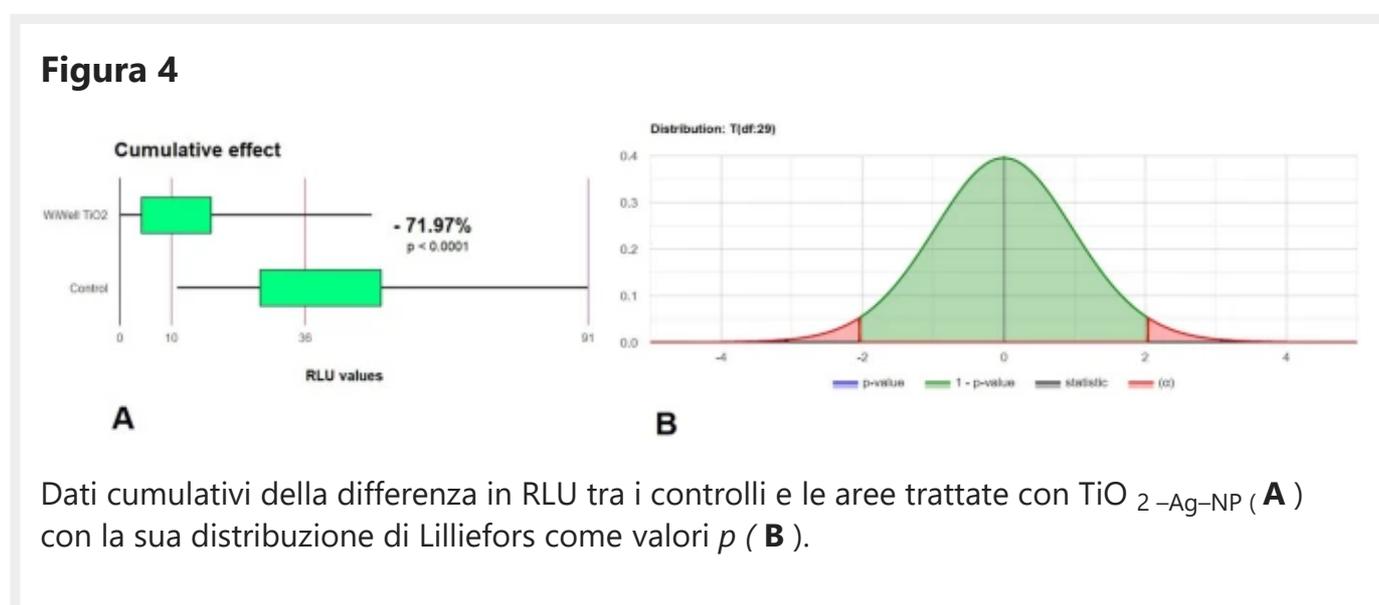
Medie (blu) ± deviazione standard (SD) (verde chiaro) dei valori RLU (controllo vs aree trattate con TiO<sub>2</sub>-Ag-NP per ogni luogo indoor indagato: ( **A** ): scuola; ( **B** ): showroom aziendale; ( **C** ): cabine di alloggi agricoli; ( **D** ): lavanderia; ( **E** ): negozio Statistiche con test di Kolmogorov-Smirnov (KS) e t-test accoppiato a due code a  $p < 0,05$ .

I dati medi RLU per lo spazio interno A (Fig. 2 A) erano distribuiti in modo non normale (test di Lilliefors  $p = 0,0002985$ ,  $K = 1,1982$ , asimmetria (S) = 2,9534) e mostravano un singolo outlier (RLU = 558), che, una volta rimosso, ha consentito alla distribuzione di riportare un'asimmetria ridotta (S = 1,7767), ma significativamente non parametrica ( $p = 0,04912$ ). Dopo l'applicazione di un singolo tipo di pellicola adesiva TiO<sub>2</sub>-Ag-NP (60 × 90 cm) nello spazio interno testato il 25 maggio 2021 e la raccolta dei dati durante 12 giorni (7 giugno 2021), il valore medio di RLU da 6 diversi punti di campionamento all'interno dell'area abitata interna, scesi da 150,33 ± 20,61 SD a 39,02 ± 5,33 SD (= - 74,04%) (Fig. 3 A). Quando abbiamo applicato il TiO<sub>2</sub>-Ag-NP alla parete di uno showroom più ampio, abbiamo monitorato la riduzione microbica ogni settimana su 5 punti campione per 2 mesi (dal 14 aprile 2021 al 17 giugno 2021) e abbiamo riportato una riduzione media di RLU da 64,20 ± 9,60 DS a 20,20 ± 6,93 DS (= - 68,53%,  $p = 0,02201$ ), sopra alle consuete procedure di pulizia di routine (Fig. 3 B). Una significativa riduzione dei valori RLU è stata ottenuta anche applicando il TiO<sub>2</sub>-Ag-NP (dimensioni inferiori) all'interno di due moduli di alloggiamento industriale per 2 settimane. La Figura 3 C mostra che, nonostante il precedente processo di pulizia, il TiO<sub>2</sub>-Ag-NP si è mantenuto più a lungo e ha aumentato l'ambiente interno sanificato riducendo l'RLU di circa l'87,18% (da 19,5 ± 2,88 SD a 2,5 ± 1,73 SD,  $p = 0,004056$ ).

Nelle aree in cui vengono effettuati processi di lavaggio, ad esempio, deposito di biancheria sporca, l'efficacia di TiO<sub>2</sub>-Ag-NP è apparsa in qualche modo meno giustificata (Fig. 3 D). I dati di RLU medi sono stati distribuiti normalmente (test di

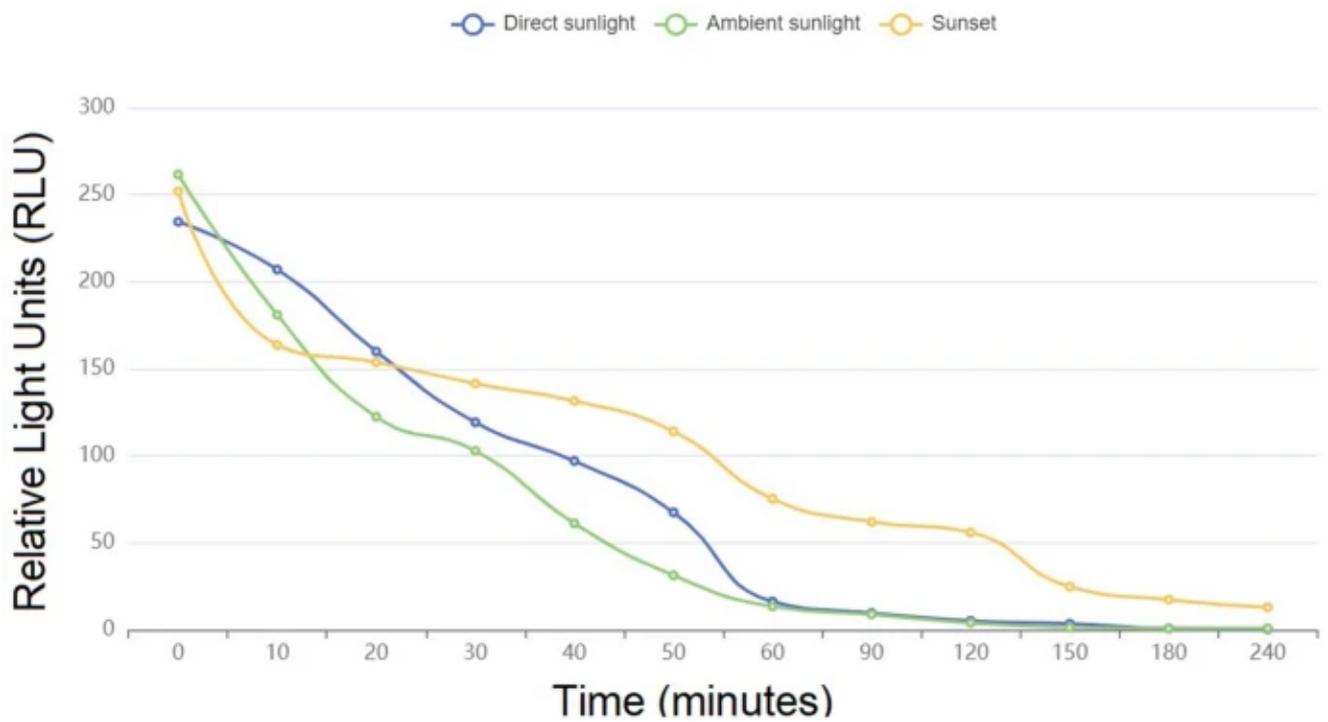
Lilliefors  $p = 0.1284$ ,  $K = 0.7467$ ,  $S = -0.5626$ ), Al contrario, l'applicazione del TiO<sub>2</sub>-Ag-NP nello spazio interno di un negozio di telefonia ha riportato, seguendo un monitoraggio di 2 mesi (dal 16 settembre 2021 al 12 novembre 2021) su 9 punti campione, una riduzione RLU da  $48,88 \pm 25,21$  SD a  $9,33 \pm 6,76$  SD ( $= -80,91\%$ ,  $p = 0,0029$ ) (Fig. 3 E ).

Complessivamente, l'applicazione del WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP ha ridotto l'RLU del 71,97% ( $p < 0,0001$ ) (Fig. 4 A), mentre la distribuzione di probabilità dei campioni è mostrata in Fig. 4 B. Distribuzione dei dati dell'insieme dei valori RLU raccolti utilizzati nello studio, sottoposti al test di Lilliefors, ha mostrato una marcata differenza rispetto alla normalità ( $p = 1.187 \times 10^{-13}$ ,  $K = 2.2347$ ,  $S = 5.8125$ ), con asimmetria positiva e curtosi (eccesso di curtosi = 39,2901). La rimozione dei valori anomali ha ripristinato la distribuzione normale (test di Lilliefors,  $p = 0,07143$ ).



La Figura 5 descrive l'andamento temporale della diminuzione dell'RLU quando il WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP funziona alla luce del giorno (senza lampade artificiali). Il film fotocatalitico raggiunge la sua soglia inferiore ( $\leq 20$  RLU) entro i primi 60 minuti di esposizione, mentre durante il tramonto a una luminometria  $\leq 100$  lx, questo valore è raggiunto da 120 minuti di esposizione continua (Tabella 2 ). Sull'emissione di luce artificiale (Fig. 6 ), la fotocatalisi funziona perfettamente, abbassando il valore RLU entro i primi 60 min di esposizione (vedi anche Tabella 2 ). Ad ogni modo, una luce diurna nuvolosa è apparsa meno efficiente (90 min invece di 60 min, Tabella 2) rispetto a una luce artificiale, probabilmente a causa delle differenze di irraggiamento. Di solito, durante una luce diurna nuvolosa, la luce artificiale può essere accesa negli uffici e nei luoghi di lavoro, quindi questa potrebbe non essere una vera preoccupazione per il fotocatalizzatore.

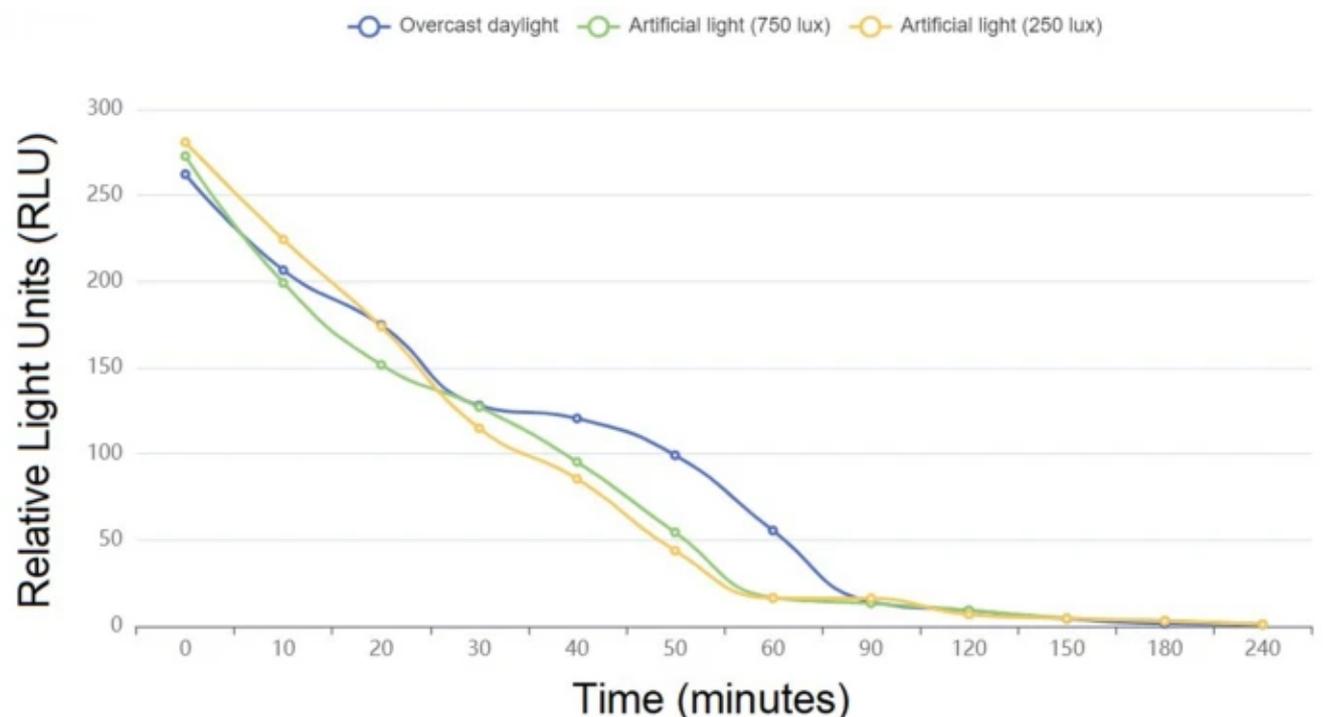
## Figura 5



Andamento temporale delle prestazioni del film fotocatalitico WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP, valutato in RLU, su diverse esposizioni diurne: linea blu (luce solare diretta 60.000 lx); linea verde (luce diurna ambiente 15.000 lx); linea arancione (tramonto 100 lx). Tracciare con il software Smart Statistics v.11.

## Tabella 2 Prestazioni del film fotocatalitico WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP su diverse sorgenti luminose.

Figura 6



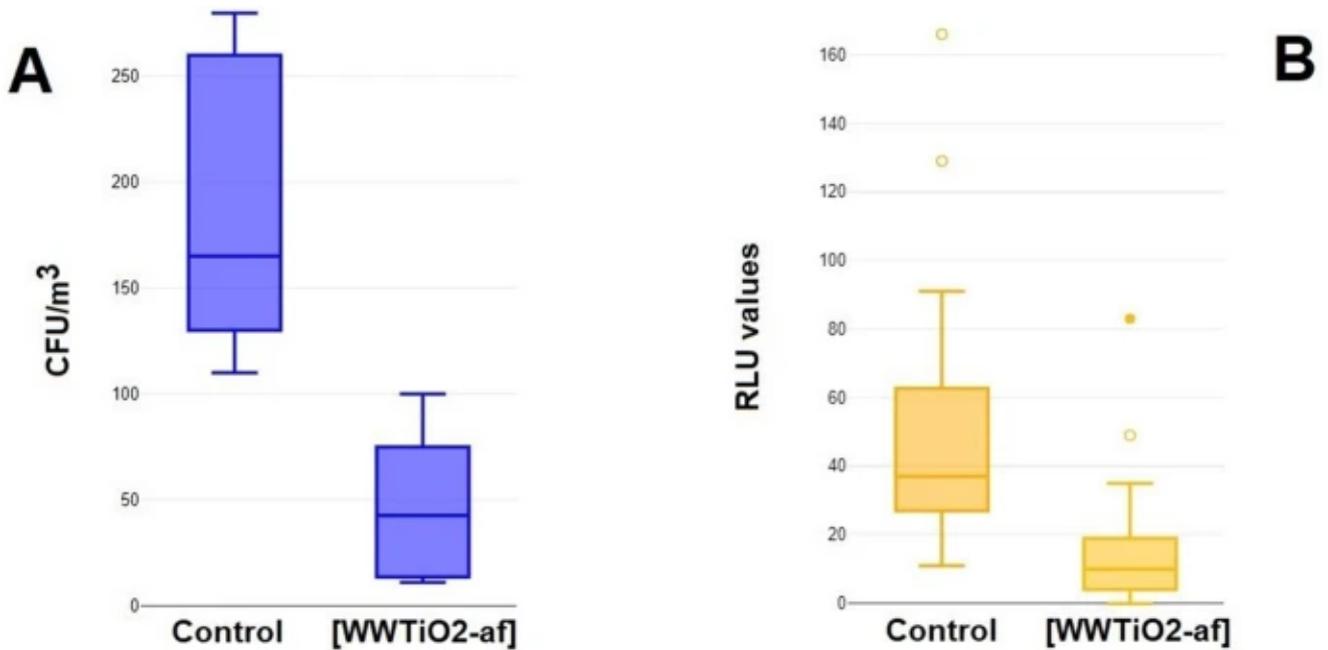
Andamento temporale delle prestazioni del film fotocatalitico WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP, valutato in RLU, su diverse esposizioni alla luce ambientale e artificiale: linea blu (luce diurna coperta 1000 lx); linea verde (lampada artificiale, 750 lx); linea arancione (lampada artificiale, 250 lx). Tracciare con il software Smart Statistics v.11.

### Riduzione di CFU/m<sup>3</sup>

L'effetto del WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP nel far cadere i microbi aerodispersi dall'ambiente interno è stato valutato anche attraverso l'indagine diretta della crescita microbica su piastre di agar e calcolando le Unità Formanti Colonie per metro cubo d'aria (CFU/m<sup>3</sup>) [49](#). Nessuna crescita di batteri e muffe è stata osservata su piastre di agar statico PD (se si escludono due casi/10 in totale) quando il contenuto ambientale microbico è sceso a  $\leq 20$  RLU (un esempio in Fig. 1 H). I risultati del TCR TECORA Pollution Check IMP-6 Bio (dimensionamento delle particelle aerodinamiche in 6 stadi) hanno mostrato che la contaminazione microbica era virile  $\leq 5$  CFU/m<sup>3</sup> nell'intervallo 5-7  $\mu\text{m}$ .

La Figura [7 A](#) mostra che la riduzione in CFU/m<sup>3</sup>, dovuta all'applicazione del film TiO<sub>2</sub>-Ag-NP in ambienti di vita interni, è stata del 74% ( $-74,38\%$ ,  $p = 0,0003892$ ), da  $182 \pm 62,50$  DS CFU/m<sup>3</sup> a  $46,62 \pm 35,30$  DS. I dati complessivi hanno mostrato una distribuzione normale (test di Lilliefors  $p = 0,7882$ ,  $K = 0,4789$ ,  $S = 0,4557$ ), ma l'esistenza di due valori anomali nel gruppo di campionamento TiO<sub>2</sub>-Ag-NP (90 e 100 CFU/m<sup>3</sup>), quando rimosso, porta il valore medio al di sotto di 35 CFU/m<sup>3</sup> ( $30,50 \pm 22,06$  SD). La Figura [7 B](#) riassume la differenza complessiva prima (controllo) e dopo l'applicazione del WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP prodotto, al fine di confrontare l'effetto della membrana di TiO<sub>2</sub> sull'inquinamento microbico dell'aria (due valori anomali sono stati rimossi in Fig. [7 B](#)). Il test di Pearson è stato adottato per valutare il confronto tra due metodi fondamentali, uno indiretto e più preciso (RLU) e uno diretto e più accurato (CFU/m<sup>3</sup>), per valutare la riduzione della popolazione microbica negli ambienti interni dotati di fotocatalizzatore dispositivo.

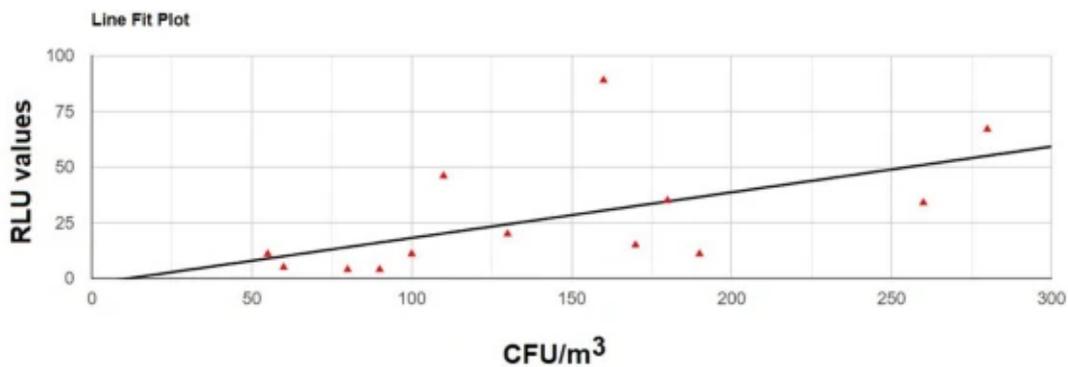
### Figura 7



Confronto tra la riduzione dell'inquinamento microbico in CFU/m<sup>3</sup> ( **A** ) e RLU ( **B** ) in un dato cumulativo di 83 punti dati. Vedere il testo per i dettagli.

Il test di correlazione di Pearson tra la percentuale di riduzione microbica da parte di TiO<sub>2</sub>-Ag-NP calcolata o in RLU o in CFU/m<sup>3</sup>, ha riportato una correlazione positiva ( $r = 0.977$ ,  $p = 0.04921$ ), valutando quindi che entrambe le valutazioni analitiche valutavano correttamente il riduzione dell'inquinamento microbico indoor grazie al film adesivo fotocatalitico TiO<sub>2</sub>-Ag-NP (Fig. [8](#)).

**Figura 8**

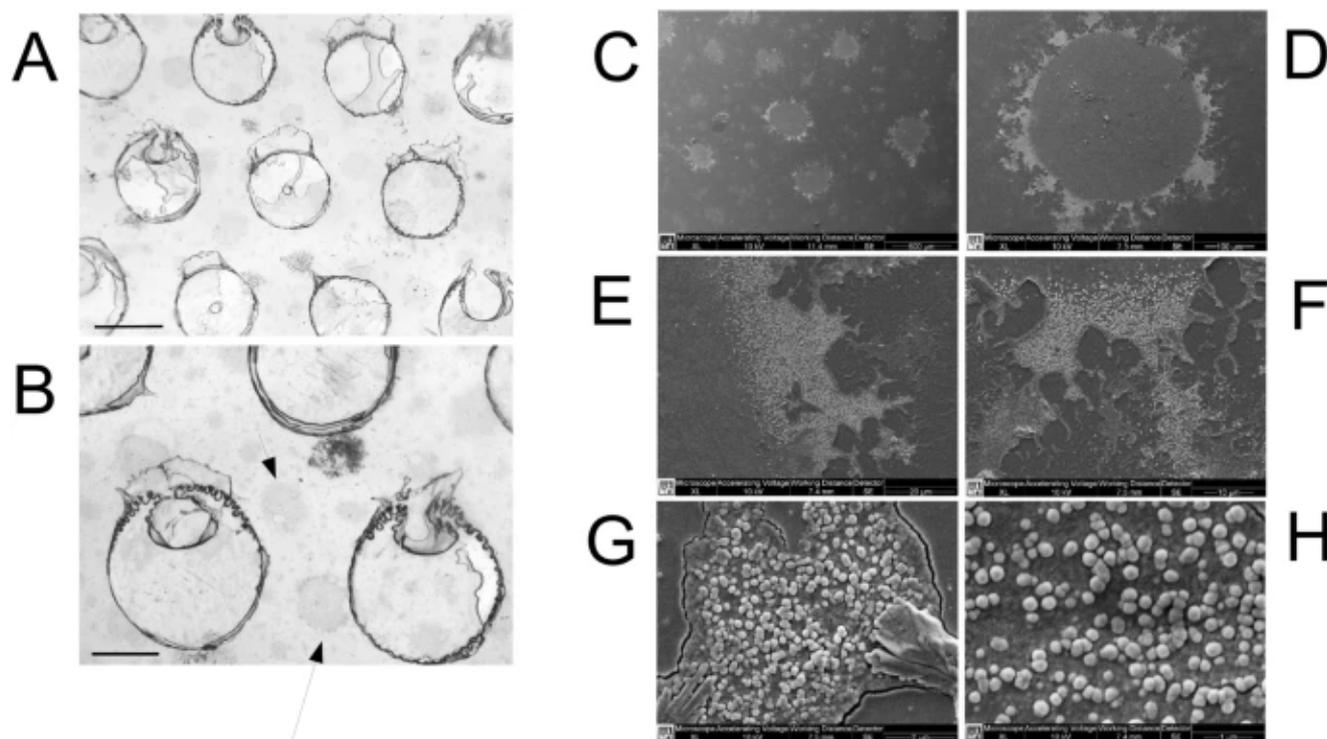


Parameter	Value
Pearson correlation coefficient (r)	0.5545
P-value	0.04921
Covariance	1052.2115
Sample size (n)	13
Statistic	2.2101

Correlazione di Pearson dei dati raccolti per la Fig. 4 facendo corrispondere il delta relativo tra i controlli e le aree trattate con TiO<sub>2</sub>-Ag-NP. Vedere il testo per i dettagli.

Un'immagine ottica e SEM del film fotocatalitico TiO<sub>2</sub>-Ag-NP è mostrata in Fig. 9.

**Figura 9**



Imaging al microscopio ottico ( **A** , **B** ) ea scansione elettronica (SEM) ( **C** – **H** ) della superficie fotocatalitica WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP. ( **A** ) Struttura porosa del film (larghezza barra = 1 mm); ( **B** ) Struttura del film fotocatalitico con macropunti fotocatalitici (freccie) (larghezza barra = 0,5 mm); ( **C** ) SEM dei macropunti fotocatalitici (500 μm), con un campione di imaging esemplificativo ( **D** ) che mostra l'area di dispersione simile a un frattale al confine (100 μm). ( **E** ) Messa a fuoco al confine a 20 μm e ( **F** ) 10 μm, che mostra il complesso fotocatalitico; ( **g** ) Nano-imaging del complesso TiO<sub>2</sub>-Ag-NP a 2 μm e ( **H** ) 1 μm.

## Discussione

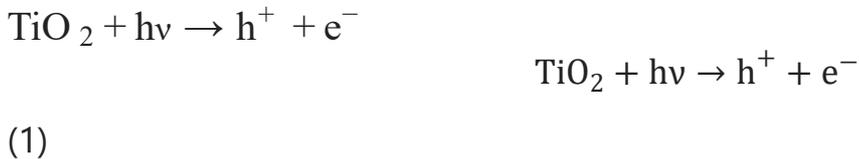
### Funzione fotocatalitica del prodotto WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP

Il biossido di titanio è un ottimo candidato per la produzione di dispositivi fotocatalitici, ma dati recenti riportano che il TiO<sub>2</sub> da solo ha una bassa efficienza di conversione solare, che si avvicina al 4% <sup>51</sup>. Questa efficienza può essere migliorata utilizzando biossido di titanio anatasio drogato con nanoparticelle d'argento per ottenere un materiale composito unidimensionale. TiO<sub>2</sub> agisce come un semiconduttore di tipo *n* nel film fotocatalitico. L'uso dell'argento (Ag) nel film fotocatalitico è stato preferito ad altri metalli (Pt, Pd, W, Re, Ru, Os, Ir), normalmente

adottati, così come l'Ag, per aumentare la barriera di Schottky tra le interfacce con il TiO<sub>2</sub>, semplicemente perché attualmente è molto più economico e più disponibile rispetto ad altri elementi con prezzo  $\geq 1.000$  USD (Ag = 23,62 USD/kg). L'argento è un metallo meno costoso utilizzato per migliorare la potenziale barriera energetica per quegli elettroni formati in una giunzione metallo-semiconduttore, nota come barriera Schottky.

È ben noto che dopo l'irradiazione di luce UV, ad esempio componenti UV dalla luce solare diretta, viene eccitato solo il semiconduttore, cioè il TiO<sub>2</sub>. In questa circostanza, per migliorare il potenziale fotocatalitico di un prodotto con TiO<sub>2</sub>, drogando il materiale fotocatalitico con nanoparticelle metalliche, permette a queste ultime di agire come una sorta di pozzo di assorbimento degli elettroni indotti dai fotoni luminosi, attraverso la barriera di Schottky, condizione che prolunga la durata della vita di questi elettroni, riducendo il tasso di ricombinazione [52](#), [53](#).

Una volta che una sorgente luminosa ha raggiunto il film fotocatalitico WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP, un fotone trasferisce un elettrone di valenza dall'orbitale di valenza di TiO<sub>2</sub> (nella banda di valenza VB) alla zona di conduttività (CB), lasciando un orbitale vuoto nella VB (Eq. [1](#)). Poiché l'anatasio TiO<sub>2</sub> ha una larghezza di banda di soglia di 3,2 eV, qualsiasi energia fotonica oltre questa soglia ecciterà gli elettroni dagli orbitali 2p dell'ossigeno (VB) agli orbitali 3d del titanio (CB):

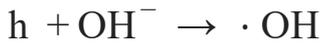


dove  $h\nu$  è un quanto di luce (fotone).

In realtà, l'ossido di titanio ha una banda proibita piuttosto ampia, che va da 3,20 eV (384 nm) nella forma cristallina del rutilo a 3,02 eV (410 nm) nell'anatasio, e questo è un limite, perché consentirebbe a tutto il biossido di titanio di assorbire solo il 4% dello spettro della luce solare. Tuttavia, il grande vantaggio del TiO<sub>2</sub> è la sua elevata proprietà semiconduttiva, che lo rende quindi un ottimo fotocatalizzatore. Il suddetto trasferimento di elettroni, lascia dei buchi nella parte superiore del VB, generando così una differenza di potenziale elettronico, separata dallo strato di carica spaziale, valutata dalla presenza della nanoparticella metallica (come Ag-NP). I buchi (cariche positive) reagiscono con le molecole d'acqua, generando radicali idrossilici ( $\cdot\text{OH}^-$ ) e ioni idrossilici ( $\text{OH}^-$ ), estremamente reattivi e ossidanti:

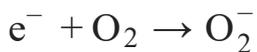


(2)



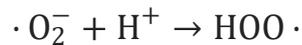
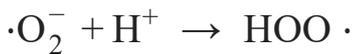
(3)

Il radicale ossidrile ( $\cdot OH$ ) è formato dallo strato superficiale di acqua sul film fotocatalitico WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP ma anche l'ossigeno può essere, seppure in misura minore, fonte di radicali estremamente reattivi, come l'anione superossido ( $\cdot O_2^{-}$ ):



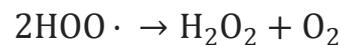
(4)

L'anione superossido può formare radicali peridrossilici (HOO·)

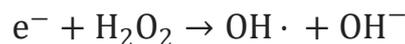
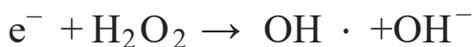


(5)

che insieme ai radicali ossidrile e superossido, ossidano e danneggiano le membrane batteriche e i capsidi virali. Inoltre, queste specie autogenerano altri radicali, tramite ossigeno e perossido di idrogeno come:



(6)



(7)

L'attività antimicrobica del film WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP è garantita dall'azione ossidativa, perossidativa e disgregante dei radicali idrossile, superossido e peridrossido sulle strutture molecolari dei microbi.

Quando il film adesivo WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP è completamente al buio (solitamente l'illuminamento è  $\leq 15$  lx), l'attività fotocatalitica del TiO<sub>2</sub> diminuisce in modo significativo, tenendo conto solo dell'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> residuo e delle specie reattive dell'ossigeno, indebolendo e /o esaurire la sua degradazione organica mediata dalla fotocatalisi in modo dipendente dal tempo, di solito entro 10-30 minuti [54](#).

### Prestazioni del prodotto WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP

L'applicazione della nostra miscela fotocatalitica TiO<sub>2</sub>-Ag nano drogata (WIWELL) su un film adesivo plastico polivinilico (WIGLASS), da noi collettivamente identificato come film adesivo TiO<sub>2</sub>-Ag-NP, ha generato un fotocatalizzatore nanotecnologico in grado di esercitare un'attività biocida verso particelle microbiche trasportate dall'aria, solitamente diffuse in tutto lo spazio interno, riducendo così la vitalità microbica e favorendo la pulizia/sanificazione dell'ambiente. Questo studio rappresenta un'ulteriore valutazione dei precedenti risultati ottenuti con l'utilizzo dei nostri fotocatalizzatori TiO<sub>2</sub> nei trasporti pubblici [20](#), ma, rappresenta ancora uno studio pilota, in quanto l'attività delle membrane fotocatalitiche per la pulizia e la sanificazione dell'aria interna attraverso un approccio a basso dispendio, fattibile e semplice, può essere citata come una vera novità nel settore, se si escludono solo poche evidenze esaminate, riportando tuttavia principalmente l'uso di reattori fotocatalitici a membrana per la depurazione delle acque reflue e dell'acqua [15](#), [24](#), [55](#). In questo manoscritto abbiamo descritto la capacità di un TiO<sub>2</sub>-Ag-NP di purificare i diversi ambienti interni da noi studiati abbassando la presenza microbica anche a valori inferiori a 35 CFU/m<sup>3</sup> e RLU  $\leq 20$ , che sono considerati indicatori biologici di una purezza estremamente elevata del clima dell'aria interna. Questo studio rappresenta una novità nel campo del film sottile fattibile, facile da maneggiare ed economico di membrane fotocatalitiche TiO<sub>2</sub>-Ag-NP per la pulizia microbica negli spazi interni. I nostri studi in corso suggeriscono finora che la capacità di questi dispositivi di mantenere uno spazio abitativo interno pulito e sano, è di lunga durata, superando ampiamente anche i periodi di valutazione qui descritti e estendendosi per diversi mesi (dati ancora non pubblicati).

L'uso di Ag-NP, secondo recenti dati XRD, migliora (utilizzando approcci di drogaggio) la stabilità della fase di titanio anatasio, aumentando anche la proprietà di stabilità dell'Ag-NP nel materiale [56](#).

Nonostante i suddetti valori siano stati ottenuti in condizioni standardizzate e lontano da spazi interni sovraffollati, tuttavia il TiO<sub>2</sub>-Ag-NP ha riportato la capacità di far cadere microparticelle microbiche dal volume dell'aria interna per almeno il 70% molto presto e entro le prime 6 ore, secondo la nostra stima in condizioni di vita comune, affollate e non standardizzate. WIWELL TiO<sub>2</sub>La pellicola adesiva -Ag-NP raggiunge le migliori prestazioni ( $\leq 20$  RLU) entro 60 minuti da un punto 0 (RLU  $\geq 250$ ) alla luce del giorno in uno spazio interno standardizzato, costante e chiuso. Ciò

dovrebbe suggerire che un microambiente indoor salubre, pulito e persino purificato può essere facilmente raggiunto e mantenuto durante una giornata lavorativa o abitativa in condizioni stabili, ventilate e termoregolate. La scomposizione dell'inquinamento microbico da parte del fotocatalizzatore procede fino a raggiungere una condizione molto simile a un microambiente igienizzato, con un'emissione luminosa costante e una ventilazione interna moderata e controllata [19](#), [57](#). L'estrema facilità di manipolazione, la fattibilità di qualsiasi processo di pulizia semplicemente fissando il TiO<sub>2</sub>-Ag-NP su una parete verticale o qualsiasi altra superficie illuminata [20](#), tecnologia a basso costo e meno dispendiosa in termini di tempo, rendono questo un approccio davvero semplice per ridurre bruscamente gli inquinanti microbici e lasciare uno spazio di vita sano e confortevole, in particolare per le persone fragili.

Questa ricerca è fondamentale per valutare l'effettiva efficacia di questi reattori fotocatalitici a membrana direttamente in spazi interni solitamente affollati da esseri umani.

Innovazioni e limiti dello studio. Pro e contro

Oltre alle informazioni materiali e tecniche protette da segreti commerciali, tra cui la componente plastica e la metodologia per costruire il film fotocatalitico TiO<sub>2</sub>-Ag-NP, la principale innovazione del prodotto fotocatalitico WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP è la sua fattibilità e facilità di utilizzo, associato ad un'ottima prestazione nella riduzione dell'inquinamento microbico in qualsiasi ambiente interno mediante la semplice applicazione del film adesivo fotocatalitico su una superficie illuminata [20](#), [58](#) (Fig. [1](#)).

La scelta del TiO<sub>2</sub> come principale fotocatalizzatore è stata dovuta alle eccellenti proprietà ottiche ed elettroniche del materiale, alla sua elevata stabilità chimica, alla non tossicità, al costo molto basso e alla compatibilità ambientale [59](#). I maggiori vantaggi nell'utilizzo del TiO<sub>2</sub> rispetto ad altri semiconduttori economici, come l'ossido di zinco bivalente (ZnO) o l'ossido di stagno tetravalente (SnO<sub>2</sub>), derivano dall'evidenza che, utilizzando il fotocatalizzatore TiO<sub>2</sub>, una velocità di fotodegradazione più elevata (0.34/h) di Procion Red MX-5B, rispetto a ZnO (0.25/h) e SnO<sub>2</sub> (0/h) [60](#). Tuttavia, i principali svantaggi nell'utilizzo di TiO<sub>2</sub> come fotocatalizzatore è la sua ampia banda proibita e un tempo di ricombinazione relativamente breve dei portatori di elettroni, un inconveniente che in qualche modo limita l'applicazione del TiO<sub>2</sub> da solo nella regione della luce visibile, influenzando così l'efficienza fotocatalitica. Il drogaggio con nanoparticelle metalliche, come Cu, Mg e Ni, in un'eterogiunzione metallo/semiconduttore di dimensioni nanometriche, ha portato a prestazioni fotocatalitiche crescenti (valutate come la cinetica della fotodecomposizione di una molecola di test organica) e Ag (Cu 0,6% in peso,  $k = 0,022/\text{min}$ , Mg 0,9% in peso,  $k = 0,019/\text{min}$ , Ni 0,5% in peso,  $k = 0,013/\text{min}$ ) [61](#), poiché l'eterogiunzione di nanoparticelle metalliche/semiconduttori estende il tempo

di separazione tra  $e^-$  e  $h^+$  e aumenta quindi la velocità di trasferimento della carica. [In](#) questo contesto, l'Ag ( $k =$  da 0,049 a 0,111/min nell'intervallo 0,05–0,174% in peso) [61,62](#) è stato preferito al Cu e ad altri metalli.

L'innovazione tecnologica del film adesivo WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP è principalmente riconducibile alla sua sostenibilità ambientale, il dispositivo è facile da applicare in qualsiasi spazio interno, dura diversi mesi in quanto lontano da qualsiasi contatto, è facilmente acquistabile ed utilizzato ed inoltre riduce l'inquinamento microbico senza ricorrere a costose ed onerose revisioni dell'edificio interno per includere la ventilazione meccanica o altri dispositivi elettromeccanici di depurazione.

Inoltre, poiché il film adesivo WIWELL TiO<sub>2</sub>-Ag-NP ha una struttura microporosa, accelera, attraverso una ritenzione della membrana adsorbente, la degradazione organica mediata dalla fotocatalisi e favorisce la presenza di micro e nanobolle dovute all'H<sub>2</sub>O struttura supramolecolare e tensioattività [63](#).

I risultati qui descritti sono incoraggianti ma con qualche limitazione.

In primo luogo, il numero di campioni dovrebbe essere ulteriormente migliorato e la loro elaborazione molto più focalizzata per ricavare dati importanti e affidabili sul turnover microbico in uno spazio interno trattato. In secondo luogo, l'esistenza di valori anomali e dati con qualche difficoltà a essere reiterati dipende dalla complessità della ricerca "sul campo", quindi una migliore standardizzazione dei metodi e dell'approccio è fondamentale, per la nostra prossima ricerca.

Infine, questo studio rappresenta in qualche modo un precursore in questo campo di ricerca. Occorrono quindi ulteriori approfondimenti.

## Conclusioni

---

Una miscela fotocatalitica commerciale TiO<sub>2</sub>-Ag nano drogata (WIWELL) su un film plastico polivinilico, qui indicata come membrana TiO<sub>2</sub>-Ag-NP, ha mostrato la capacità di ridurre drasticamente l'inquinamento microbico in diversi tipi di spazi interni semplicemente applicando questo fotocatalitico dispositivo all'interno della stanza dell'edificio. Il film adesivo TiO<sub>2</sub>-Ag-NP descritto può essere uno strumento promettente per ripulire l'aria dalla contaminazione microbica e fungina in poche ore semplicemente attaccando il fotocatalizzatore su una parete, in una strategia facile da maneggiare, fattibile ed economica.

## Disponibilità dei dati

---

I set di dati utilizzati e/o analizzati durante il presente studio sono disponibili presso l'autore corrispondente su ragionevole richiesta. Le immagini (foto) sono originali e fornite da Luca Berto (Fig. [1](#)) e da Paolo Bernardi (Fig. [9](#)).

## Riferimenti

---

Obee, TN & Brown, RT TiO<sub>2</sub> fotocatalisi per applicazioni di aria interna: effetti dell'umidità e dei livelli di tracce di contaminanti sui tassi di ossidazione di formaldeide, toluene e 1,3-butadiene. *Dintorni. Sci. Tecnol.* **29** (5), 1223–1231 (1995).

---

Klare, M., Waldner, G., Bauer, R., Jacobs, H. & Broekaert, JA Degradazione di composti organici contenenti azoto mediante fotocatalisi combinata e ozonizzazione. *Chemosfera* **38** (9), 2013-2027 (1999).

---

Maness, PC *et al.* Attività battericida della reazione fotocatalitica TiO<sub>2</sub>: Verso una comprensione del suo meccanismo di uccisione. *Appl. Dintorni. Microbiolo.* **65** (9), 4094–4098 (1999).

---

Chun, H., Yizhong, W. & Hongxiao, T. Distruzione della soluzione acquosa di fenolo mediante fotocatalisi o fotolisi diretta. *Chemosfera* **41** (8), 1205-1209 (2000).

---

Klare, M., Scheen, J., Vogelsang, K., Jacobs, H. & Broekaert, JA Degradazione di alchil- e alcanolammine a catena corta mediante fotocatalisi assistita da TiO<sub>2</sub> e Pt/TiO<sub>2</sub>. *Chemosphere* **41** (3), 353–362 (2000).

---

Ohko, Y. *et al.* Degradazione del bisfenolo A in acqua mediante fotocatalizzatore TiO<sub>2</sub>. *Dintorni. Sci. Tecnol.* **35** (11), 2365–2368 (2001).

---

Zhang, H., Itoi, T., Konishi, T. & Izumi, Y. Doppi ruoli fotocatalitici della luce: separazione della carica al gap di banda e calore tramite risonanza plasmonica superficiale localizzata per convertire CO<sub>2</sub> in CO<sub>su</sub> ossido di argento-zirconio. *Marmellata. Chim. soc.* **141**, 6292–6301 (2019).

---

Khan, MI, Bhatti, KA, Qindeel, R., Althobaiti, HS & Alonizan, N. Proprietà strutturali, elettriche e ottiche di film sottili multistrato di TiO<sub>2</sub> depositati mediante rivestimento di rotazione sol-gel. *Risultati Fis.* **7**, 1437–1439 (2017).

---

Aghaee, M., Verheyen, J., Stevens, AAE, Kessels, WMM & Creatore, M. TiO<sub>2</sub> modelli di film sottili preparati mediante deposizione di vapore chimico e deposizione di strati atomici utilizzando una stampante per microplasma a pressione atmosferica. *Processo al plasma Polym.* **16**, 1900127 (2019).

---

Kavaliunas, V., Ceplikas, P., Sriubas, M. & Laukaitis, G. La sensibilizzazione del film sottile di TiO<sub>2</sub> mediante nanoparticelle di Ag per il miglioramento dell'efficienza fotocatalitica. *Appl. Sci.* **12**, 5725–5735 (2022).

---

Kavaliunas, V. *et al.* Influenza dei droganti Mg, Cu e Ni sull'attività fotocatalitica di film sottili di TiO<sub>2</sub> amorfo. *Materials* **13**, 886 (2020).

---

Kavaliunas, V., Hatanaka, Y., Neo, Y., Laukaitis, G. & Mimura, H. Progettazione strutturale di fotoelettrodi ibridi TiO<sub>2</sub> / Si e contro fotoelettrodi senza Pt per la separazione dei portatori di carica nelle reazioni di scissione dell'acqua. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* **10**, 103015 (2021).

---

Singh, S., Mahalingam, H. & Singh, PK Fotocatalizzatori di biossido di titanio supportati da polimeri per il risanamento ambientale: una recensione. *Appl. Catal. A Gen.* **462–463**, 178–195 (2013).

---

Fajia, L. *et al.* Film Nano-TiO<sub>2</sub> @Ag/PVC con potenziate attività antibatteriche e proprietà fotocatalitiche. *Appl Superficie Sci.* **258** (10), 4667–4671 (2012).

---

Bui, VKH *et al.* Materiali fotocatalitici per sistemi di purificazione dell'aria interna: una mini-recensione aggiornata. *Dintorni. Technol. Innov.* **22**, 101471 (2021).

---

Alkawareek, MY, Bahloul, A., Abulateefeh, SR & Alkilany, AM Attività antibatterica sinergica di nanoparticelle d'argento e perossido di idrogeno. *PLoS ONE* **14** (8), e0220575 (2019).

---

De Pasquale, I. *et al.* Materiali nanostrutturati fotocatalitici a base di TiO<sub>2</sub> per l'inattivazione microbica. *Catalizzatori* **10** (12), 1382–1428 (2020).

---

Lu, Y. *et al.* Inattivazione di SARS-CoV-2 e degradazione fotocatalitica mediante rivestimenti fotocatalitici TiO<sub>2</sub>. *Sci. Rep.* **12**, 16038. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20459-2> (2022).

---

Paschoalino, MP & Jardim, WF Disinfezione dell'aria interna utilizzando un fotoreattore TiO<sub>2</sub> supportato da poliestere. *Aria interna* **18** (6), 473–479 (2008).

---

Tirelli, U., Berto, L. & Chirumbolo, S. WiWell® TiO<sub>2</sub> - pellicole adesive fotocatalitiche per ridurre la carica microbica nei microambienti indoor del trasporto pubblico e garantire la biosicurezza ai tempi del COVID-19. *J. Fotochimica. Fotobiolo.* **12**, 100143 (2022).

---

Sharma, S. *et al.* Una panoramica sui recenti progressi nella purificazione dell'aria fotocatalitica: fotocatalisi a base di metallo e senza metallo. *Dintorni. Ris.* **214** (Pt 3), 113995 (2022).

---

Matsuura, R. *et al.* Disinfezione SARS-CoV-2 dell'aria e contaminazione superficiale da danno mediato da fotocatalizzatore TiO<sub>2</sub> a morfologia virale, RNA e proteine. *Virus* **13** (5), 942 (2021).

---

Nakano, R. *et al.* Inattivazione di vari tipi di varianti di SARS-CoV-2 mediante fotocatalizzatore a base di TiO<sub>2</sub> sensibile alla luce per interni. *Sci. Rapp.* **12** (1), 5804 (2022).

---

Foster, HA, Ditta, IB, Varghese, S. & Steele, A. Disinfezione fotocatalitica con biossido di titanio: spettro e meccanismo dell'attività antimicrobica. *Appl. Microbiolo. Biotecnol.* **90** (6), 1847–1868. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3213-7> (2011).

---

Gamage, J. & Zhang, Z. Applicazioni di disinfezioni fotocatalitiche. *Int. J. Fotoenergia* **2010**, 764870 (2010).

---

Zacarias, SM, Manassero, A., Pirola, S., Alfano, OM & Satuf, ML Progettazione e valutazione delle prestazioni di un reattore fotocatalitico per la disinfezione dell'aria interna. *Dintorni. Sci. Inquinare. Ris. Int.* **28** (19), 23859–23867. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11663-6> (2021).

---

Ren, Y. *et al.* Controllo dell'attività microbica sulle pareti mediante una vernice nanocomposita fotocatalitica: uno studio sul campo. *Sono. J. Infettare. Controllo* **50** (4), 427–434 (2022).

---

Andualem, Z., Gizaw, Z., Bogale, L. & Dagne, H. Carica batterica interna e sua correlazione con i parametri fisici di qualità dell'aria interna nelle scuole primarie pubbliche. *Multidisciplinare Respiro. Med.* **14**, 2 (2019).

---

Zhu, YD *et al.* Qualità dell'aria interna nella scuola primaria della Cina: risultati dello studio CIEHS 2018. *Dintorni. Inquinare.* **291**, 118094 (2021).

---

Kõljalg, S., Mändar, R., Söber, T., Rööp, T. & Mändar, R. Contaminazione batterica di alto livello dei telefoni cellulari degli studenti delle scuole secondarie. *Germi* **7** (2), 73–77 (2017).

---

Sariola, L. Classificazione dell'ambiente interno 2018 e criteri aggiornati della classificazione ambientale RTS SBE 19—Emerging Concepts for Sustainable Built Environment. *IOP Conf. Ser. Ambiente terrestre. Sci.* **297**, 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/297/1/012045> (2019).

---

Schibuola, L. & Tambani, C. Classificazione della qualità ambientale interna degli ambienti scolastici monitorando i livelli di concentrazione di PM e CO<sub>2</sub>. *Inquinamento bancomat. Ris.* **11**, 332–342 (2020).

---

Lepore, E., Aguilera Benito, P., Piña Ramírez, C. & Viccione, G. Ventilazione indoor in tempi di confinamento per epidemia di SARS-CoV-2: un approccio comparativo tra Spagna e Italia. *Sostenere. Città Soc.* **72**, 103051 (2021).

---

Zong, H., Wang, J., Zhou, T., Sun, J. & Chen, X. L'influenza dei cambiamenti transitori nel comfort termico interno ed esterno sull'uso dello spazio esterno da parte degli anziani nella casa di cura. *Edifici* **12**, 905–927 (2022).

---

Prakash, D. & Ravikumar, P. Analisi del comfort termico e delle caratteristiche del flusso d'aria interna per una stanza di un edificio residenziale in posizione di apertura della finestra generalizzata sulle pareti adiacenti. *Int. J. Sostenere. Costruito. Dintorni.* **4** (1), 42–57 (2015).

---

van Arkel, A. *et al.* Misurazione dell'ATP come metodo oggettivo per misurare la contaminazione ambientale in 9 ospedali nell'area di confine olandese/belga. *Antimicrobico. Resistere. Infettare. Controllo.* **9** (1), 77 (2020).

---

Younès, A., Lukyanenko, YO, Lyashkov, AE, Lakatta, EG & Sollott, SJ Un metodo di bioluminescenza per la misurazione diretta dell'attività della fosfodiesterasi. *Anale. Biochimica.* **417** (1), 36–40 (2011).

---

SIST EN ISO 14698–1:2004 Camere bianche e ambienti controllati associati— Controllo della biocontaminazione - Parte 1: Principi e metodi generali (ISO 14698–1:2003) <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/c225ad19-26fd-4460-a639-9ec1da24fefe/sist-en-iso-14698-1-2004>

---

Normativa italiana per le analisi microbiologiche nei luoghi di lavoro. *Ambienti di Lavoro—Contaminazione microbiologica dell'aria (Batteri e miceti) Determinazione mediante campionatore attivo per impatto su fluido* . [https://www.inail.it/cs/internet/docs/linee\\_guida\\_monitoraggio\\_microbiologico\\_pdf.pdf?section=attivita](https://www.inail.it/cs/internet/docs/linee_guida_monitoraggio_microbiologico_pdf.pdf?section=attivita) .

---

Napoli, C., Marcotrigiano, V. & Montagna, MT Procedure di campionamento dell'aria per valutare la contaminazione microbica: un confronto tra metodi attivi e passivi nelle sale operatorie. *BMC Salute pubblica* **12** , 594 (2012).

---

Jeong, BS, Ko, HS, Hen, KJ, Shin, JH & Jung, JH Distribuzione delle dimensioni e concentrazione di bioaerosol batterici e fungini coltivabili indoor. *Atmosfera Dintorni. X* **15** , 100182 (2022).

---

Skocaj, M., Filipic, M., Petkovic, J. & Novak, S. Biossido di titanio nella nostra vita quotidiana; è sicuro?. *Radiol. Oncol.* **45** (4), 227–247 (2011).

---

Grande, F. & Tucci, P. Nanoparticelle di biossido di titanio: un rischio per la salute umana?. *min. Rev.Med. Chim.* **16** (9), 762–769 (2016).

---

Ze, Y. *et al.* Neurotossicità e profilo espresso dal gene nei topi con lesioni cerebrali causati dall'esposizione a nanoparticelle di biossido di titanio. *J.Biomed. Madre. Ris. A.* **102** (2), 470–478 (2014).

---

Aruoja, V., Dubourguier, HC, Kasemets, K. & Kahru, A. Tossicità delle nanoparticelle di CuO, ZnO e TiO<sub>2</sub> per le microalghe *Pseudokirchneriella subcapitata*. *Sci. Ambiente totale*. **407** (4), 1461–1468 (2009).

---

Kasemets, K., Ivask, A., Dubourguier, HC & Kahru, A. Tossicità delle nanoparticelle di ZnO, CuO e TiO<sub>2</sub> per il lievito *Saccharomyces cerevisiae*. *Tossicolo In Vitro*. **23** (6), 1116-1122 (2009).

---

Zouzelka, R., Cihakova, P., Rihova Ambrozova, J. & Rathousky, J. Azione biocida combinata di nanoparticelle e ioni d'argento contro Chlorococcales (*Scenedesmus quadricauda*, *Chlorella vulgaris*) e alghe filamentose (*Klebsormidium* sp.). *Dintorni. Sci. Inquinare. Ris. Int.* **23** (9), 8317–8326 (2016).

---

Lekamge, S. *et al.* La tossicità delle nanoparticelle d'argento su tre invertebrati d'acqua dolce con diverse strategie di vita: *Hydra vulgaris*, *Daphnia carinata* e *Paratya australiensis*. *Ambiente anteriore. Sci.* **6**, 152 (2013).

---

Soukaina, A. *et al.* Ag/Ag<sub>2</sub>O come co-catalizzatore nella fotocatalisi del TiO<sub>2</sub>: effetto del rapporto di massa co-catalizzatore/fotocatalizzatore. *Catalizzatori* **8**, 647–665 (2018).

---

Tabata, A., Zhang, D., Maeda, T., Nagamune, H. & Kourai, H. Contaminazione microbica nelle operazioni di lavanderia domestica in Giappone. *Biocontrollo Sci.* **8** (1), 9-18 (2003).

---

Kim, KD, Han, DN, Lee, JB & Kim, HT Formazione e caratterizzazione di nanoparticelle di TiO<sub>2</sub> depositate con Ag mediante metodo di riduzione chimica. *Scr. Madre*. **34** (2), 143–146 (2006).

---

Khan, MR, Chuan, TW, Yousuf, A., Chowdhury, MNK & Cheng, barriera di CK Schottky e fenomeni di risonanza plasmonica superficiale verso la reazione fotocatalitica: studio dei loro meccanismi per migliorare l'attività fotocatalitica. *Catal. Sci. Tecnol.* **5**, 2522–2531 (2015).

---

Permporn, D. *et al.* Approfondimento sui ruoli del carico di metallo sui comportamenti di riduzione fotocatalitica di CO<sub>2</sub> del TiO<sub>2</sub>. *Nanomateriali* **12**, 474 (2022).

---

Dominguez Sanchez, L. *et al.* Sospensione di TiO<sub>2</sub> esposta a H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> alla luce ambientale o al buio: degradazione del blu di metilene e evidenza EPR per le specie radicaliche dell'ossigeno. *Appl. Catal. B* **142–143**, 662–667 (2013).

---

Subramaniam, MN *et al.* Membrane fotocatalitiche: una nuova prospettiva per la rimozione degli inquinanti organici persistenti. *Dintorni. Sci. Inquinare. Ris. Int.* **29** (9), 12506–12530 (2022).

---

Chakhtouna, H., Benzeid, H., Zari, N., Qaiss, AEK & Bouhfid, R. Recenti progressi sui fotocatalizzatori Ag/TiO<sub>2</sub>: comportamenti fotocatalitici e battericidi. *Dintorni. Sci. Inquinare. Ris. Int.* **28** (33), 44638–44666 (2021).

---

Cristina, ML *et al.* Monitoraggio microbiologico dell'aria nelle sale operatorie con flusso d'aria turbolento: è possibile calcolare e ipotizzare nuovi parametri di riferimento per il carico microbico dell'aria?. *Int. J. Ambiente. Ris. Sanità pubblica* **18** (19), 10379 (2021).

---

Diasanayake, MAKL, Senadeera, GKR, Sarangika, HNM, Ekanayake, PMPC, Tothawattage, CA, Divarathne, HKDWMNR e Kumari, JMKW TiO<sub>2</sub> come materiale multifunzionale a basso costo. *Madre. Oggi Proc.* **35**, S40–S47 (2016) 5a conferenza internazionale su materiali e dispositivi funzionali (ICFMD 2015)

---

Chen, X. & Mao, nanomateriali di biossido di titanio SS: sintesi, proprietà, modifiche e applicazioni. *Chim. Rev.* **107** (7), 2891–2959 (2007).

---

Wu, CH Confronto dell'efficienza di degradazione del colorante azoico utilizzando sistemi a semiconduttore UV/singolo e UV/a semiconduttore accoppiato. *Chemosphere* **57**, 601–608 (2004).

---

Natarajan, TS, Thomas, M., Natarajan, K., Bajaj, HC & Tayade, RJ Studio sul processo UV-LED/TiO<sub>2</sub> per la degradazione del colorante Rodamina B. *Chim. Ing. J.* **169**, 126–134 (2011).

---

Pipelzadeh, E., Valizadeh Derakhshan, M., Babaluo, AA, Haghghi, M. & Tavakoli, A. Decomposizione dell'acido formico utilizzando nanocomposito Ag / TiO<sub>2</sub> sintetizzato in mezzi di acqua etanolica sotto illuminazione della luce UV vicina. *Int. J. Nanosci. Nanotecnologia*. **7** (2), 78-86 (2011).

Goei, R. & Lim, TT Membrana fotocatalitica TiO<sub>2</sub> decorata con Ag con architettura gerarchica: attività fotocatalitica e antibatterica. *Acqua Ris.* **59C**, 207-218 (2014).

## Informazioni sull'autore

### Autori e affiliazioni

Dipartimento di Neuroscienze, Biomedicina e Movimento, Unità di Anatomia Umana, Università di Verona, Strada Le Grazie 8, 37134, Verona, Italia

Salvatore Chirumbolo, Andrea Sbarbati & Paolo Bernardi

Dipartimento di Diagnostica e Sanità Pubblica, Unità di Microbiologia, Università di Verona, Verona, Italia

Davide Gibellini

Laboratori esperti di chimica dei materiali, Treviso, Italia

Luca Berto

Tirelli Medical Group, Pordenone, Italia

Cinzia Cirrito & Umberto Tirelli

Azienda Ospedaliera Universitaria Integrata, Verona, Italia

Antonio Vella

Consiglio per la medicina nutrizionale e ambientale, Mo i Rana, Norvegia

Geir Bjorklund

### Contributi

LB, DGUT e SC hanno concepito il rationale e il piano di ricerca, raccolto i dati (LB, CC e AV), elaborato i dati (SC e AV), rivisto e supervisionato i dati (DG e UT); AS ha messo a disposizione la tecnologia e i dispositivi di imaging; PB ha eseguito l'imaging al microscopio ottico e al SEM; SC ha scritto il manoscritto principale, GB e UT hanno supervisionato il manoscritto e collaborato alla creazione delle figure, SC ha creato le figure, AS, UT, AV. e DG ha supervisionato e rivisto l'articolo e i dati elaborati, SC ha presentato l'articolo.

autore corrispondente

Corrispondenza a [Salvatore Chirumbolo](#).