



Riccardo Mancini

Associate professor in Special Education and Pedagogy | Department of Human Sciences | Link Campus University | r.mancini@unilink.it

Inquinamento ambientale e incidenza del deficit di attenzione e iperattività (ADHD) Environmental pollution and incidence of attention deficit hyperactivity disorder (ADHD)

Call

Attention Deficit/Hyperactivity Disorder (ADHD) or Attention Deficit/Hyperactivity Disorder (ADHD) is a lifelong disorder of neurobiological origin that begins in childhood or preadolescence. The latest edition of the Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders published in 2022 establishes a classification system that intends to sort mental illnesses into diagnostic categories based on the description and analysis of symptoms, considering in relation to individuals the expressive and behavior-related features as reflections of thoughts and emotions and as obvious consequences of the course of the illness. ADHD is found classified among Neurodevelopmental disorders and is manifested through neurobehavioral symptoms: changes in attention spans and consequent difficulty in concentration, hyperactivity or impulsivity, and excessive consequent impairment in social functioning, school performance, or constant and continuous work or daily activity. The origin of the disorder has many and varied causes, and the possibility of it becoming a genetic inheritance has been recognized at 70-80%, as certain genes, including dopamine and serotonin, are associated with neurotransmitter functions. Other factors such as biological, psychological or environmental conditions may also play a role and act individually or synergistically in the course of ADHD. Important to consider exposure to air pollutants as a possible reason for the occurrence of Neurodevelopmental Disorders, such as Autism Spectrum Disorder (ASD) and ADHD.

Keywords: ADHD | environmental pollution | neurodevelopmental disorders | environmental exposure | neurotoxicity

L'ADHD (*Attention Deficit/Hyperactivity Disorder* o *Disturbo da Deficit di attenzione/iperattività* (DDAI)) è un disturbo permanente di origine neurobiologica che inizia nella fanciullezza o nella preadolescenza.

L'ultima edizione del *Manuale Diagnostico e Statistico dei Disturbi Mentali* pubblicata nel 2022 stabilisce un sistema di classificazione che intende ordinare le malattie mentali in categorie diagnostiche basate sulla descrizione e l'analisi dei sintomi, considerando in relazione agli individui le caratteristiche espressive e quelle legate ai comportamenti come riflessi di pensieri ed emozioni e come evidenti conseguenze del decorso della malattia. L'ADHD si trova classificato tra i disturbi del Neurosviluppo e si manifesta attraverso sintomi neuro-comportamentali: cambiamenti dei periodi di attenzione e conseguente difficoltà di concentrazione, iperattività o impulsività ed eccessiva conseguente compromissione del funzionamento sociale, della prestazione scolastica o di una costante e continua attività lavorativa o quotidiana.

L'origine del disturbo ha molte e varie cause e la possibilità che diventi un'eredità genetica è stata riconosciuta al 70-80%, in quanto alcuni geni, tra cui dopamina e serotonina, sono associati alle funzioni dei neurotrasmettitori. Altri fattori come condizioni biologiche, psicologiche o ambientali possono avere anch'essi un ruolo ed agire in modo individuale o sinergico nel decorso dell'ADHD. Importante considerare l'esposizione agli inquinanti atmosferici come possibile motivo per il manifestarsi di *Disturbi del neurosviluppo*, come il *Disturbo dello Spettro Autistico (ASD)* e l'ADHD.

Parole chiave: ADHD | inquinamento ambientale | disturbi del neurosviluppo | esposizione ambientale | neurotossicità

OPEN ACCESS Double blind peer review

How to cite this article: Mancini, R. (2024). Environmental pollution and incidence of attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) *Italian Journal of Special Education for Inclusion*, XII, 1, 244-252. <https://doi.org/10.7346/sipes-01-2024-23>

Corresponding Author: Riccardo Mancini | r.mancini@unilink.it

Received: 20/03/2024 | **Accepted:** 02/06/2024 | **Published:** 29/06/2024

Italian Journal of Special Education for Inclusion | © Pensa MultiMedia®
ISSN 2282-6041 (on line) | DOI: 10.7346/sipes-01-2024-23



1. L'inquinamento e le conseguenze sulla salute

Nel 2018 l'Organizzazione mondiale della Sanità (OMS) ha ritenuto l'inquinamento atmosferico uno dei più evidenti rischi per la salute. Considerando il possibile legame tra una prolungata esposizione a sostanze nocive nell'aria e le conseguenze negative sulla vita quotidiana, si è osservato che gli inquinanti possono depositarsi nei polmoni e causare stress ossidativo e infiammazione. Questa infiammazione può raggiungere il cervello attraverso l'epitelio olfattivo o la circolazione sanguigna, superare la barriera emato-encefalica e causare neurotossicità e danno neuronale.

La ricerca del *Global Burden of Disease Study 2019* ha calcolato che l'inquinamento dell'aria ha causato circa 6,5 milioni di morti all'anno. Quasi certamente questi dati continueranno a crescere nel tempo, principalmente a causa dell'aumento delle sostanze tossiche e nocive, specialmente nei Paesi a basso e medio reddito in Asia, Africa e Medio Oriente.

Il traffico veicolare è la principale causa dello smog e dei problemi di salute, soprattutto nelle aree con un alto tasso di circolazione urbana.

È importante considerare le frequenti, complesse e difficili interazioni tra gli agenti inquinanti e i processi fisiologici. In generale, il danno è proporzionale alla quantità di sostanze nocive e tossiche e alla durata dell'esposizione. Pertanto, si può affermare che l'inquinamento rappresenta un rischio significativo, soprattutto per chi vive nelle grandi città o è esposto all'aria inquinata per motivi di lavoro.

Ricerche e analisi condotte in Cina hanno valutato la presenza di vari gradi di esposizione al particolato (PM) che variano a seconda dei vari mezzi di trasporto utilizzati nelle aree urbane (Zheng, 2021). Il maggior livello appare evidente con gli spostamenti in bicicletta (55mg) e in autobus (20,9 mg), mentre risulta essere inferiore quando viene utilizzata l'automobile (17 mg).

È evidente che, a seconda dei sintomi manifestati immediatamente dopo l'esposizione o dopo un certo periodo di tempo, si possono osservare effetti a breve o a medio-lungo termine. Le conseguenze più gravi sono associate a un'esposizione prolungata a sostanze tossiche o cancerogene. Queste ultime, infatti, sembrano poter causare malattie croniche come asma, fibrosi polmonare, cancro ai polmoni, infiammazioni respiratorie e, secondo alcuni studi, persino danni cerebrali.

Negli ultimi anni sembra che questo possa essere motivo addirittura di alcuni danni neurologici e psichiatrici, come demenza, depressione e schizofrenia.

L'inquinamento dell'aria, inoltre, è stato considerato come uno dei fattori di probabilità di decadimento cognitivo e malattie correlate al neuro sviluppo, come i disturbi dello spettro autistico (ASD) o quelli associati al Sistema Nervoso Centrale.

Sempre più evidenti, inoltre, sono gli effetti negativi sulla salute che si verificano anche in seguito ai livelli più bassi di quelli considerati "a rischio" di qualità dell'aria.

Il cervello in particolare sembra essere particolarmente sensibile alla ricezione di particelle tossiche e quindi appare quasi certa una correlazione tra sostanze nocive e danni neurologici. Alcune ricerche scientifiche evidenziano che i componenti dell'inquinamento atmosferico possono avere conseguenze serie, diventando fattori di rischio per disturbi come ASD e ADHD (Myhre et al., 2018).

2. Impatto dell'inquinamento atmosferico sull'ADHD: ricerche primarie e secondarie

Negli ultimi anni si è assistito a un incremento significativo degli studi che indagano la possibile connessione tra l'esposizione alle sostanze tossiche presenti nell'aria e l'insorgenza dell'ADHD. La ricerca scientifica in questo ambito può essere classificata in due categorie principali: analisi primaria e analisi secondaria.

L'analisi primaria comprende osservazioni dirette, test e verifiche volti a raccogliere dati essenziali e iniziali. Questo tipo di ricerca è fondamentale per generare nuove conoscenze e indicare una possibile correlazione tra inquinanti atmosferici e ADHD. Un esempio tipico di analisi primaria è lo studio di coorte, che osserva e studia elementi di una popolazione specifica potenzialmente esposta a fattori di rischio.



Tale studio è di tipo “longitudinale”, in quanto monitora un gruppo di persone per un periodo prolungato, valutando l’incidenza di malattie come l’ADHD in relazione all’esposizione agli inquinanti.

Ad esempio, studi di coorte recenti hanno rivelato che l’esposizione prenatale e nei primi anni di vita a particolato fine (PM2.5 e PM10), ossidi di azoto (NOx) e altre sostanze inquinanti è associata a un aumento del rischio di sviluppare ADHD. Liu e colleghi (2022) hanno dimostrato che l’esposizione a PM2.5 durante la gravidanza è collegata a comportamenti associati all’ADHD nei bambini. Allo stesso modo, Peterson et al. (2022) hanno riscontrato alterazioni cerebrali strutturali e funzionali nei bambini esposti prenatalmente a PM2.5 e PAH, suggerendo un meccanismo neurotossico dell’inquinamento atmosferico.

L’analisi secondaria raccoglie ed esamina i risultati ottenuti da ricerche precedenti. Questo tipo di analisi è cruciale per organizzare, sistematizzare e interpretare la vasta mole di dati esistenti.

La revisione della letteratura comporta una ricerca bibliografica approfondita che può essere sistematica se condotta con una metodologia precisa. Questo tipo di revisione sintetizza i dati esistenti su un determinato argomento, fornendo un quadro completo delle conoscenze attuali. Ad esempio, la revisione di Myhre et al. (2018) ha esplorato come il particolato atmosferico possa influenzare lo sviluppo neurologico, suggerendo che lo stress ossidativo e l’infiammazione cronica siano fattori chiave.

La meta-analisi, invece, utilizza strumenti statistici per valutare la congruenza delle conclusioni emerse da vari studi e verificare se i risultati siano comparabili e corretti. Una meta-analisi recente condotta da Dalla et al. (2022) ha analizzato 28 inquinanti atmosferici, trovando che 12 di essi mostrano una relazione significativa con l’ADHD, sebbene complessivamente non sia stato trovato un rapporto significativo tra inquinanti e ADHD a causa delle differenze metodologiche tra gli studi.

Nonostante le evidenze crescenti che suggeriscono un legame tra inquinamento atmosferico e ADHD, i risultati non sono uniformi. Le differenze metodologiche, le variabili confondenti non controllate e la mancanza di studi longitudinali su larga scala rappresentano sfide significative nella conferma di una relazione causale diretta.

In conclusione, la maggior parte delle ricerche suggerisce un potenziale impatto dell’inquinamento atmosferico sullo sviluppo dell’ADHD. Tuttavia, sono necessarie ulteriori ricerche per chiarire i meccanismi sottostanti e sviluppare politiche di sanità pubblica efficaci. È essenziale promuovere studi di alta qualità con popolazioni ampie e tempi di osservazione prolungati per validare queste associazioni e formulare interventi preventivi basati su prove solide. La promozione di politiche pubbliche che riducano l’esposizione agli inquinanti atmosferici è cruciale per proteggere le popolazioni vulnerabili, in particolare i bambini e le donne in gravidanza.

3. Revisioni di letteratura sistematiche e meta-analisi

In una situazione generale nella quale risultano essere poche le ricerche di meta-analisi che analizzano, considerino e sintetizzino l’associazione tra inquinamento ambientale e ADHD, lo studio di Dalla et al. del 2022 (Dalla MDB et al., 2022) è la più recente indagine sistematica con meta-analisi di rischio di ADHD in individui esposti all’inquinamento nocivo e tossico dell’aria. Essa è un approfondimento preciso, puntuale e coerente della probabilità di ADHD dovuta all’esposizione agli elementi inquinanti dell’aria negli adolescenti fino ai diciotto anni.

Dei ventotto inquinanti analizzati da una revisione sistematica correlata allo studio su elementi riguardo l’inquinamento ambientale in relazione all’ADHD, è emerso che dodici di essi non hanno rilevato alcun legame importante, quattro sono sembrati avere qualche attinenza, mentre altri dodici hanno riportato una relazione significativa con il disturbo. Nel momento in cui è stata effettuata la meta-analisi non è stato riscontrato, quindi, alcun rapporto significativo a livello di inquinanti ambientali visti nella loro globalità. I ricercatori hanno evidenziato che i risultati emersi dai loro studi hanno indicato conclusioni diverse rispetto ad altri appoggi scientifici che mostrano invece forte correlazione tra inquinanti ambientali e ADHD. Ciò è dovuto forse a differenti metodologie utilizzate e soprattutto alla mancanza di meta-analisi precedenti.



La selezione dei 28 inquinanti analizzati è stata basata su una combinazione di criteri di rilevanza scientifica e disponibilità di dati. Sono stati inclusi inquinanti comunemente studiati nella letteratura epidemiologica come il particolato (PM_{2.5} e PM₁₀), ossidi di azoto (NO_x), ozono (O₃), e composti organici volatili (VOC), tra gli altri. Per determinare le correlazioni con l'ADHD, i ricercatori hanno utilizzato modelli statistici avanzati che tenevano conto di vari fattori confondenti come l'età, il sesso, lo stato socio-economico e la presenza di altre condizioni mediche.

La ricerca di Yuchi et al. del 2022 (Yuchi, et al., 2022) esamina altri aspetti ed in particolare il legame tra esposizione all'inquinamento ambientale, numero di spazi verdi esistenti, quantità di rumore rilevato e presenza di individui con ADHD. La particolarità di questo studio risiede nell'aver evidenziato casi di manifestazioni del disturbo tenendo conto di elementi specifici e criteri scientifici con alta sensibilità alla base di analisi sviluppate in un arco temporale in Canada.

In precedenza, le indagini di questo tipo traevano la loro origine perlopiù da quanto riportato dalla famiglia e dagli ambienti scolastici tramite test e griglie di osservazione sistematica o questionari sulla sintomatologia dell'ADHD piuttosto che su diagnosi mediche e dati scientifici diagnostici. Rispetto ai lavori precedenti, inoltre, è stato ritenuto fondamentale l'esposizione al rumore, analizzando una coorte più numerosa. La ricerca può anche essere considerata come uno dei primi studi sul campo che indaghi sulle relazioni e sulle conseguenze di esposizioni ambientali di vario tipo legate alla presenza dell'ADHD. Per definire i valori analitici degli spazi verdi, di particolato nell'aria (PM_{2.5}), di ossidi di azoto e di inquinamento acustico, sono stati approfonditi vari modelli di stima con analisi accurate e precise. Per le nascite si è ritenuto di far fede ai censimenti presenti.

Lo studio ha considerato nella metropoli di Vancouver in Canada, 37.000 nati tra il 2000 e il 2007, riscontrando 1.217 situazioni di casi di ADHD. In particolare, l'essere esposti al particolato PM_{2.5} è stato causa della crescita di persone con la diagnosi qui considerata, mentre gli ossidi di azoto e l'inquinamento acustico conseguente non sono risultati fondamentali nel rilevare un successivo danno neurologico. Sicuramente, invece, il vivere accanto a spazi verdi ha prodotto un numero minore di incidenza di malattie. Ciò che si è evidenziato dagli studi effettuati è che i bambini che giocano ed abitano in quartieri più verdi con basso inquinamento ambientale hanno un rischio molto ridotto di ADHD (calo del 50% dell'HR) rispetto ai coetanei che risiedono in quartieri con livelli elevati di sostanze nocive nell'aria e con poco verde (aumento del 62% dell'HR).

Per quanto riguarda un'altra ricerca che considera gli stessi elementi, la revisione sistematica di Myhre et al. del 2018 ha effettuato numerose indagini, ma non una meta-analisi degli esiti. Essa riferisce varie congetture eziologiche e i funzionamenti molecolari che potrebbero illustrare il ruolo degli agenti inquinanti nelle alterazioni dello sviluppo neurologico. Dagli approfondimenti effettuati vengono riportate conclusioni di numerosi studi condotti. In particolare, si evidenzia che il particolato atmosferico (PM) e le sostanze nocive come composti organici e tracce di metalli possono influenzare la crescita e lo sviluppo del bambino già in utero. Non è da escludere, inoltre, un possibile legame tra esposizione all'inquinamento dell'aria prima o dopo il parto ed i successivi sintomi di ADHD. Le analisi e le ricerche evidenziano quindi che il PM può essere una causa reale di rischio di Disturbo da Deficit di Attenzione/Iperattività rispetto ad altre diagnosi e può essere in parte associato all'esposizione agli inquinanti ambientali, incluso il PM.

In termini di metodologia, Dalla et al. (2022) hanno seguito rigorosi criteri di selezione degli studi includendo solo quelli con dati di esposizione verificabili e diagnosi di ADHD confermate da professionisti medici. I metodi di analisi hanno incorporato tecniche di meta-regressione per valutare l'eterogeneità tra gli studi e l'impatto di variabili moderatrici. I parametri utilizzati per valutare l'esposizione agli inquinanti includevano misurazioni ambientali standardizzate e dati satellitari per il monitoraggio della qualità dell'aria. Questi approcci hanno permesso una valutazione più accurata delle correlazioni tra inquinamento ambientale e ADHD, evidenziando la complessità delle interazioni tra fattori ambientali e la salute neurologica.

Il team di Dalla et al. ha selezionato studi epidemiologici che esaminavano la relazione tra esposizione a inquinanti atmosferici specifici e diagnosi di ADHD. I criteri di selezione includevano la necessità di misurazioni oggettive dell'esposizione agli inquinanti (come dati di qualità dell'aria da stazioni di monito-



raggio) e l'uso di criteri diagnostici standardizzati per l'ADHD, come quelli del DSM-5. Inoltre, gli studi dovevano fornire dati sufficienti per il calcolo degli effetti combinati, come rischio relativo e odds ratio.

Nella meta-analisi, i ricercatori hanno utilizzato modelli ad effetti casuali per tenere conto delle differenze tra gli studi e pesato i risultati in base alla varianza inversa. Hanno valutato l'eterogeneità usando il test Q di Cochran e la statistica I^2 . Per la valutazione dell'esposizione agli inquinanti, sono stati utilizzati dati ambientali da stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria, modelli di dispersione degli inquinanti e dati satellitari. Gli inquinanti analizzati includevano particolato fine (PM2.5), particolato grossolano (PM10), ossidi di azoto (NOx), ozono (O3), biossido di zolfo (SO2), composti organici volatili (VOC) e metalli pesanti.

Dei ventotto inquinanti analizzati, dodici non hanno rilevato alcun legame significativo con l'ADHD, quattro hanno mostrato una correlazione debole e dodici hanno riportato una relazione significativa con il disturbo. Tuttavia, complessivamente, la meta-analisi non ha trovato un rapporto significativo tra inquinanti ambientali e ADHD. I ricercatori suggeriscono che le differenze metodologiche e la mancanza di meta-analisi precedenti possano spiegare le discrepanze con studi precedenti che avevano trovato forti correlazioni.

4. Corrispondenza e causalità tra elementi inquinanti e insorgenza dell'ADHD

Le ricerche analizzate hanno incrociato dati sull'inquinamento dell'aria con quelli medici per individuare un possibile legame tra l'esposizione a sostanze tossiche e nocive e l'aumento dei casi di ADHD. Tuttavia, confrontando l'incidenza di disturbi nei soggetti esposti all'inquinamento ambientale con quelli non esposti, non è sempre possibile affermare con certezza l'esistenza di un rapporto causa-effetto. Questo rapporto potrebbe essere eziologico, spurio o non causale.

Un rapporto eziologico implica che l'esposizione al fattore di rischio provoca direttamente la malattia. Ad esempio, l'inalazione di particolato fine potrebbe causare infiammazione nel cervello in via di sviluppo, portando a sintomi di ADHD. Al contrario, un rapporto spurio o falso si verifica se il disturbo non dipende dagli agenti inquinanti atmosferici, ma è causato da errori sistematici negli studi che portano a una stima errata del legame tra inquinamento e ADHD. Infine, un rapporto non causale si verifica quando l'esposizione all'inquinamento e il disturbo sono associati a un terzo fattore confondente, come lo status socio-economico, che è estraneo ad entrambi ma influisce su entrambi.

Per valutare se esiste una relazione causale tra inquinamento atmosferico e insorgenza dell'ADHD, si considerano diversi fattori chiave. Innanzitutto, è essenziale verificare se esiste un'associazione significativa tra l'esposizione agli inquinanti e la comparsa dell'ADHD. Questo richiede uno studio sistematico dei dati e l'utilizzo di modelli statistici appropriati per isolare l'effetto dell'inquinamento da altre variabili.

La rilevanza temporale è un altro aspetto critico: il periodo di esposizione agli agenti inquinanti deve essere considerato rispetto all'insorgenza della malattia per stabilire una relazione temporale plausibile. Ad esempio, l'esposizione prenatale e nei primi anni di vita potrebbe avere un impatto diverso rispetto all'esposizione in età adolescenziale.

Una associazione netta implica che la presenza di sostanze nocive è direttamente correlata alla manifestazione del disturbo. Questo può essere valutato utilizzando studi longitudinali che seguono i soggetti nel tempo, monitorando l'esposizione agli inquinanti e la comparsa di sintomi di ADHD.

L'osservazione sistematica e l'uso di metodi rigorosi per raccogliere e analizzare i dati sono fondamentali per garantire la qualità e l'affidabilità delle informazioni. Inoltre, è importante stabilire l'attendibilità biologica della relazione, ossia dimostrare che esiste un meccanismo biologico plausibile che spiega come l'esposizione agli inquinanti possa causare ADHD. Questo può includere studi su modelli animali o ricerche cellulari che mostrano come gli inquinanti influenzano lo sviluppo neurologico.

La coerenza dei dati è verificata confrontando i risultati con quelli di altri studi per garantire che le conclusioni siano consistenti e riproducibili. La certezza scientifica si ottiene quando i risultati sono supportati da prove solide e replicabili, riducendo al minimo l'incertezza. Infine, la peculiarità degli strumenti



utilizzati è cruciale: l'utilizzo di strumenti di misurazione accurati per valutare l'esposizione agli inquinanti garantisce la precisione delle stime.

Nella pianificazione delle ricerche epidemiologiche, è fondamentale osservare, segnalare ed eliminare ogni possibile variabile confondente che potrebbe influenzare i risultati della ricerca. Tuttavia, negli studi legati all'ambiente, le analisi si basano principalmente su dati emergenti dall'osservazione sistematica, rendendo difficile controllare preventivamente tutti i fattori di rischio. Questa difficoltà è ancora più evidente quando si considerano ricerche precedenti, come registri demografici e cartelle cliniche, dove le informazioni su altri fattori potenzialmente legati all'insorgenza dell'ADHD possono essere difficili da reperire o inesatte.

5. Ricerche eziologiche

Tra le ipotesi che potrebbero essere elaborate su una possibile connessione tra l'esposizione all'inquinamento da sostanze nocive e tossiche e i disturbi del neuro sviluppo, emergono diversi meccanismi biologici potenzialmente rilevanti. Questi includono lo stress ossidativo, l'infiammazione cronica, l'alterazione dei sistemi neuro recettoriali, endocrini, neuroendocrini e immunitari, compresi i disturbi legati alla tiroide e una diminuzione del livello del fattore neurotrofico derivato dal cervello (BDNF).

Lo stress ossidativo, ad esempio, si verifica quando l'esposizione agli inquinanti atmosferici aumenta la produzione di specie reattive dell'ossigeno (ROS) che, se non bilanciate adeguatamente da antiossidanti, possono danneggiare le cellule neuronali. Questo danno ossidativo può compromettere la funzione neuronale e contribuire allo sviluppo di disturbi neuropsichiatrici come l'ADHD.

L'infiammazione cronica è un altro meccanismo chiave. Gli inquinanti atmosferici possono attivare microglia e astrociti nel cervello, portando a una risposta infiammatoria persistente. Questo stato infiammatorio può interferire con il normale sviluppo cerebrale e influenzare negativamente la neurogenesi e la sinaptogenesi.

Le alterazioni dei sistemi neuro recettoriali, endocrini e neuroendocrini rappresentano ulteriori meccanismi di interesse. Gli inquinanti possono alterare la segnalazione dei neurotrasmettitori, come la dopamina e la serotonina, che sono cruciali per la regolazione dell'umore, del comportamento e delle funzioni cognitive. Inoltre, l'interferenza con il sistema endocrino può disturbare l'equilibrio ormonale, influenzando processi vitali come la crescita e lo sviluppo cerebrale.

L'impatto sul sistema immunitario e sui disturbi legati alla tiroide è particolarmente rilevante, dato che l'asse tiroide-ipotalamo-ipofisi gioca un ruolo critico nello sviluppo neurologico. Gli inquinanti possono disturbare la funzione tiroidea, alterando i livelli di ormoni tiroidei essenziali per lo sviluppo cerebrale e contribuendo così ai disturbi neuropsichiatrici.

Uno studio significativo che esplora il legame tra particolato (PM) e sviluppo del sistema nervoso centrale è quello di Peterson et al. (2022). Questo studio ha rilevato che l'esposizione al PM_{2,5} e agli idrocarburi policiclici aromatici (PAH) ha ripercussioni a livello molecolare sullo sviluppo cerebrale, influenzando le vie cortico-striatali e talamo-corticali. Tali alterazioni possono provocare disfunzioni nella formulazione del pensiero, nelle emozioni e nel comportamento, suggerendo un potenziale meccanismo attraverso cui l'inquinamento atmosferico può contribuire allo sviluppo di disturbi come l'ADHD.

In conclusione, l'analisi delle possibili connessioni tra esposizione agli inquinanti atmosferici e disturbi del neuro sviluppo richiede un approccio multidisciplinare che integri dati epidemiologici, biologici e clinici per comprendere appieno i meccanismi sottostanti e sviluppare strategie di prevenzione e intervento efficaci.



6. Conclusioni

L'ADHD è un disturbo che presumibilmente si riscontra spesso in ambito scolastico. In Italia la percentuale dei bambini e degli adolescenti che ne sono affetti è di circa l'1%, ma i sintomi di iperattività, impulsività e disattenzione arrivano a riguardare fino al 3-6% degli studenti (Crispiani, 2019).

Causato prevalentemente da fattori genetici non modificabili, ha origine anche da molti altri motivi intuibili e prevedibili. Riuscire a riconoscerli è fondamentale e comporta responsabilità enormi a livello individuale, familiare e sociale (Wittchen HU et al., 2019), in quanto potrebbe creare una diminuzione nella sua progressione ed evoluzione. Per questo l'individuare e il ridurre le cause di rischio che si possono controllare e modificare sono elementi che potrebbero diminuire l'incidenza della patologia.

Come è stato rilevato precedentemente, vari studi hanno confermato il legame tra l'inquinamento atmosferico e l'ADHD.

Gli esiti delle ricerche scientifiche sono risultati disomogenei, anche se è da riconoscere che la maggior parte di esse riconosce che l'inquinamento ambientale, il particolato (PM) e l'assorbimento di sostanze tossiche possono avere un'influenza sulla crescita del bambino soprattutto nei primi mesi di gestazione ed in particolar modo in relazione ai disturbi del neuro sviluppo, incluso l'ADHD.

È comunque da tener presente che le analisi svolte ed esaminate hanno considerato spesso piccoli elementi del campione da analizzare, senza soffermarsi su altri fattori *confondenti* come l'inquinamento acustico o i fattori socioeconomici.

Per quanto riguarda l'associazione emersa tra l'essere esposti all'inquinamento del particolato (PM) ed i sintomi di ADHD, si è osservato che spesso si verifica con maggiore evidenza mostrando il sorgere di alcuni meccanismi patologici, come lo stress ossidativo, l'infiammazione, le disfunzioni neuro recettoriali ed endocrine (Liu, et al., 2022). Queste osservazioni, seppur basate da elementi ripetuti nel tempo, necessitano comunque di ulteriori analisi e sperimentazioni che diano la certezza di quanto emerso dalle osservazioni e dalle ipotesi emerse.

Dubbi sulla veridicità di tali teorie derivano da altri studi, in particolare da alcune ricerche di coorte effettuate fino al 2019 che non evidenziavano una connessione rilevante a livello statistico tra la patologia e la presenza di tossicità nell'aria.

Un'ulteriore ricerca di coorte condotta in Cina ha evidenziato che l'esposizione prematura al particolato (PM) e all'ossido d'azoto (NO₂) era collegata a un incremento del sorgere di comportamenti iperattivi dei bambini nell'infanzia. Per questo motivo gli studiosi hanno cercato di riconoscere i periodi temporali più vicini al pericolo di sviluppare disturbi come l'ADHD o similari, derivati dall'esposizione all'inquinamento dell'aria nociva, identificandoli negli ultimi mesi della gravidanza e i primi post partum come i più rischiosi per la sensibilizzazione all'esposizione al particolato (PM) e all'ossido d'azoto (NO₂). È stato ed è sempre importante analizzare questi momenti temporali per una giusta pianificazione di provvedimenti legati al benessere e alla salute e per la realizzazione dei giusti interventi da attuare.

Un'ulteriore analisi di coorte svolta a Taiwan (Chang, et al., 2022) ha determinato che la maggiore criticità si determinava nei primi tre mesi di gravidanza e nel periodo 0-3 di vita del bambino, confermando quanto già emerso. In questo modo hanno ritenuto di suggerire ai governi nazionali di rivalutare i criteri per stabilire la più salubre qualità dell'aria in modo da rispondere in maniera corretta e soddisfare le linee guida dell'OMS per proteggere le donne in gravidanza e i neonati dal rischio di contrarre ADHD.

Un'indagine scientifica in Pennsylvania ha rilevato un collegamento tra le considerevoli concentrazioni nell'aria di SO₂, CO E PM_{2,5} e l'assunzione di farmaci specifici per l'ADHD (ADHD-MA) tra gli alunni degli istituti delle scuole primarie. I ricercatori evidenziano la necessità di proporre e incrementare piani cautelativi per abbassare fino al livello minimo l'esposizione dei bambini con ADHD nei giorni e/o periodi dell'anno in cui sono ipotizzate maggiori concentrazioni di inquinanti atmosferici per avere miglioramenti oggettivi con l'analisi e lo studio delle cause che portano ad accrescere il disturbo considerato (Saadeh, et al., 2022).

A ribadire queste ricerche si riporta uno studio effettuato in Corea, dove si evidenzia il forte legame tra l'esposizione al particolato (PM) e l'ADHD fino all'età adolescenziale, ribadendo il bisogno di produrre



ulteriori prove dell'impatto dell'inquinamento dell'aria sui Disturbi del neurosviluppo (Shim, et al., 2022).

Le discrepanze nei sistemi di misura degli elementi tossici e della preminenza dell'ADHD, la varietà degli abitanti, le cause "confondenti" non sempre approfondite e controllate e i differenti metodi di studio indicano il bisogno di effettuare ancora analisi scientifiche e specifiche di elevata qualità per convalidare gli esiti rilevati e nel fornire prove più solide sul rapporto tra l'esposizione all'inquinamento atmosferico e l'ADHD.

L'elaborazione di comunicazioni scientifiche certe è essenziale per sviluppare interventi di sanità pubblica basati su prove scientifiche come proposto dal metodo *Evidence-informed decision-making, EIDM*, appoggiato anche dall'Organizzazione Mondiale della Sanità.

Per tali motivi, per esaminare a fondo la conoscenza dell'inquinamento atmosferico come causa di rischio dell'ADHD, bisogna che vengano incrementati programmi di studio che prevedano popolazioni più estese e tempi di osservazione maggiori con un più preciso accertamento dei fattori *confondenti*.

L'ADHD è un disturbo neurobiologico che, sebbene frequentemente osservato in ambito scolastico, ha cause complesse che includono fattori genetici e ambientali. In Italia, la percentuale di bambini e adolescenti affetti da ADHD varia dall'1% al 6%, a seconda dei criteri diagnostici utilizzati. Oltre ai fattori genetici, le cause ambientali, inclusa l'esposizione agli inquinanti atmosferici, rappresentano un'area di crescente interesse e preoccupazione per la salute pubblica.

Per esaminare a fondo l'inquinamento atmosferico come causa di rischio per l'ADHD, è necessario incrementare i programmi di studio che prevedano popolazioni più estese e tempi di osservazione maggiori, con un più preciso accertamento dei fattori confondenti. La ricerca futura dovrebbe mirare a sviluppare strategie di prevenzione e intervento basate su una comprensione approfondita dei meccanismi patogenetici legati all'esposizione agli inquinanti atmosferici.

In conclusione, mentre vi è un crescente consenso sul potenziale impatto dell'inquinamento atmosferico sullo sviluppo neurologico e sui disturbi come l'ADHD, è cruciale continuare a investire in ricerche multidisciplinari e longitudinali per validare queste associazioni e per formulare politiche di salute pubblica efficaci volte a proteggere le popolazioni vulnerabili, in particolare i bambini e le donne in gravidanza.

Riferimenti bibliografici

- Chang, Y. C., et al. (2022). PM2.5 exposure and incident attention-deficit/hyperactivity disorder during the prenatal and postnatal periods: A birth cohort study. *Environmental Research*, 214, 1.
- Crispiani, P. (2019). *Ippocrate Pedagogico. Manuale professionale di pedagogia speciale della abilitazione e riabilitazione*. (Scheda sindromica pp. 94-95. Disturbo di Attenzione e di Iperattività. Altieri D. e Bullegas D.). Ed. Itard.
- Dalla, M. D. B., et al. (1987). Environmental pollution and attention deficit hyperactivity disorder: A meta-analysis of cohort studies. *Environmental Pollution* (Barking, Essex: 1987), 315.
- Global Burden of Disease Collaborative Network. (2021). *Global Burden of Disease Study 2019 (GDB 2019) Results*. Seattle, United States: Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME).
- Health Effects Institute. (2020). *State of Global Air 2020*. Special Report. Boston.
- Liu, B., et al. (2022). Fetal exposure to air pollution in late pregnancy significantly increases ADHD-risk behavior in early childhood. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(17), 10482.
- Myhre, O., et al. (2018). Early life exposure to air pollution particulate matter (PM) as a risk factor for attention deficit/hyperactivity disorder (ADHD): Need for novel strategies for mechanisms and causalities. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 354.
- Paparella, N. (Ed.). (2018). *Tempo imperfetto*. Bari: Progedit.
- Peterson, B. S., et al. (2022). Prenatal exposure to air pollution is associated with altered brain structure, function, and metabolism in childhood. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 63(11).
- Saadeh, R. A., et al. (2022). Air pollutants and attention deficit hyperactivity disorder medication administration in elementary schools. *Biomedical Reports*, 17(5), 85.
- Shim, J. I., et al. (2022). Exposure to particulate matter as a potential risk factor for attention-deficit/hyperactivity disorder in Korean children and adolescents (KNHANES 2008-2018). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(21), 13966.



- Wittchen, H. U., et al. (2011). The size and burden of mental disorders and other disorders of the brain in Europe 2010. *European Neuropsychopharmacology: The Journal of the European College of Neuropsychopharmacology*, 21(9).
- World Health Organization. (2021). *Evidence policy impact*. WHO guide for evidence-informed decision-making.
- World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.
- Yuchi, W., et al. (2022). Neighborhood environmental exposures and incidence of attention deficit/hyperactivity disorder: A population-based cohort study. *Environment International*, 161.
- Zheng, J., et al. (2021). Commuter PM exposure and estimated life-expectancy loss across multiple transportation modes in Xi'an, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 214.