
L'INQUINAMENTO DEGLI AMBIENTI CONFINATI



INDICE

METODOLOGIA DI STUDIO	pg. 4
ARIA INDOOR	6
Ambiente domestico	8
Uffici	10
Mezzi di trasporto	11
EFFETTI SULLA SALUTE	
12	
PATOLOGIE DA AGENTI TOSSICI O IRRITANTI:	15
Radon	15
Ossidi di azoto	16
Ossido di carbonio	
17	
Ozono	19
Formaldeide	
19	
Composti Organici Volatili	21
PATOLOGIE DA IPERSENSIBILITA'.	
INQUINANTI BIOLOGICI	21
PATOLOGIE DA AGENTI INFETTIVI	24
SICK BUILDING SYNDROME	25
CARATTERIZZAZIONE CHIMICA DEGLI INQUINANTI ORGANICI INDOOR	
28	
CARATTERIZZAZIONE DEGLI EFFETTI SULLA SALUTE	31
a) effetti sensoriali	34
percezione	36
informazione dose-effetto	36
impatto	37
b) effetti derivati	37



variazioni nel tempo	38
c) genotossicità e cancerogenicità	44
ALTRI RISCHI POTENZIALI.	
Pesticidi	48
Nitrosamine	49
Cloruro di Vinile	49
Idrocarburi aromatici polinucleari	50
Composti organici aeriformi derivanti da materiali da costruzione, arredi e prodotti d'uso	51
CONSERVAZIONE E MIGLIORAMENTO DELLA QUALITA' DELL'ARIA IN AMBIENTI CONFINATI	52
CONCLUSIONI	53
BIBLIOGRAFIA	56

METODOLOGIA DI STUDIO

Gli studi epidemiologici costituiscono uno strumento essenziale per studiare gli effetti dell'inquinamento atmosferico, ma sono sempre di difficile progettazione ed esecuzione poiché la qualità dell'aria sia outdoor che indoor non è un dato fisso e stabile ma riserva continue variazioni.

Il punto di partenza di qualsiasi progetto epidemiologico deve consistere nella definizione di tutti gli eventi riferibili alla "salute respiratoria" che possano essere considerati indice di *reazione respiratoria avversa*.

Sinteticamente l'American Thoracic Society definisce come "eventi avversi alla salute respiratoria" quelle modificazioni fisiologiche o patologiche caratterizzate da una delle seguenti caratteristiche:

- 1) interferenza con le normali attività della persona o delle persone affette;
- 2) deficit respiratorio episodico;
- 3) deficit inabilitante;
- 4) danno anatomico respiratorio permanente;
- 5) progressiva alterazione funzionale respiratoria;
- 6) morte.

Ovviamente, partendo dalla morte sino all'interferenza con le normali attività gli effetti divengono progressivamente meno importanti ma, con il continuo progredire della tecnologia medica, possono essere percepite modificazioni che, in precedenza, erano di dubbio significato clinico.

Non tutte le modificazioni respiratorie debbono essere ritenute necessariamente avverse ed il limite tra le modificazioni fisiologiche e patologiche può essere controverso. A mo' d'esempio, l'Environmental Protection Agency (EPA) considera non importante dal punto di vista medico l'irritazione della gola, del naso e degli occhi che può verificarsi per esposizione allo smog urbano, ancorché questo costituisca un fastidio



non indifferente che si ripercuote inevitabilmente sullo stato di salute, soltanto se questa irritazione contribuisce ad innescare un attacco asmatico, l'effetto viene considerato avverso alla salute.

Un problema non indifferente è rappresentato dal giudizio che si può formulare sulle alterazioni respiratorie reversibili. E' ovvio che un attacco asmatico, ancorché rapidamente reversibile, rappresenterà sempre un effetto avverso alla salute, perché interferisce con le normali attività della persona. Ma come giudicare piccole riduzioni della funzionalità respiratoria, in concomitanza di brevi incrementi dell'inquinamento atmosferico, rapidamente reversibili? In tal senso un aiuto parziale può venire da tests standardizzati negli ultimi anni, i quali evidenziano lo stato di iperreattività bronchiale aspecifica: mi riferisco ai tests di provocazione bronchiale con metacolina istamina ecc.

In generale l'aumento della prevalenza di sintomi respiratori cronici rilevabili dall'uso di questionari e soprattutto della *tosse* dovrebbe essere considerato un effetto avverso alla salute; ma, ad esempio, l'*espettorato* è altamente correlato con il fumo di sigaretta, tende a scomparire con la cessazione del fumo e non può essere un buon indicatore degli effetti avversi dell'inquinamento atmosferico. Perciò i non fumatori costituiscono un modello di studio più utile per valutare le modificazioni conseguenti all'inquinamento, ancorché il fumo passivo possa costituire un fattore di confusione. L'aumento della prevalenza della dispnea o dell'incidenza di episodi respiratori acuti, che interferiscano con le normali attività ricadono inevitabilmente nella categoria degli effetti avversi alla salute.

Ogni incremento di un sintomo in una popolazione deve mostrare una differenza statisticamente significativa rispetto ad una popolazione standard.

Lo studio epidemiologico osservazionale o descrittivo della mortalità e morbosità respiratorie in popolazioni diversamente esposte consente di evidenziare come uno stato morboso possa essere incrementato dall'esposizione ad alti livelli di inquinanti o viceversa ridotto



in presenza di bassi livelli degli stessi ma non consente di dimostrare il nesso di causalità tra inquinamento ambientale e patologia umana.

All'uopo si rendono indispensabili gli studi epidemiologici analitici i quali possono essere sostanzialmente di 2 tipi:

- 1) studio analitico trasversale tipo caso-controllo il quale esamina la sintomatologia o la funzione respiratoria in popolazioni esposte in un preciso momento a diversi tassi di inquinamento;
- 2) studio analitico longitudinale o di *coorte* nel quale le popolazioni esposte a diversi tassi di inquinamento vengono seguite prospetticamente ai fini di valutarne la comparsa di alterazioni della sintomatologia o della funzione respiratoria.

Lo studio epidemiologico *sperimentale* costituisce il corollario finale degli studi analitici. Esso consiste nell'artificiale modificazione dei livelli di esposizione e nello studio delle modificazioni consensuali che si verificano nelle popolazioni esposte. Non è accettabile sul piano etico uno studio epidemiologico che comporti un aumento delle esposizioni nocive artificialmente indotto; pertanto gli studi epidemiologici sperimentali si basano essenzialmente sul comportamento delle popolazioni di aree in cui sia stata ottenuta una riduzione di uno o più contaminanti.

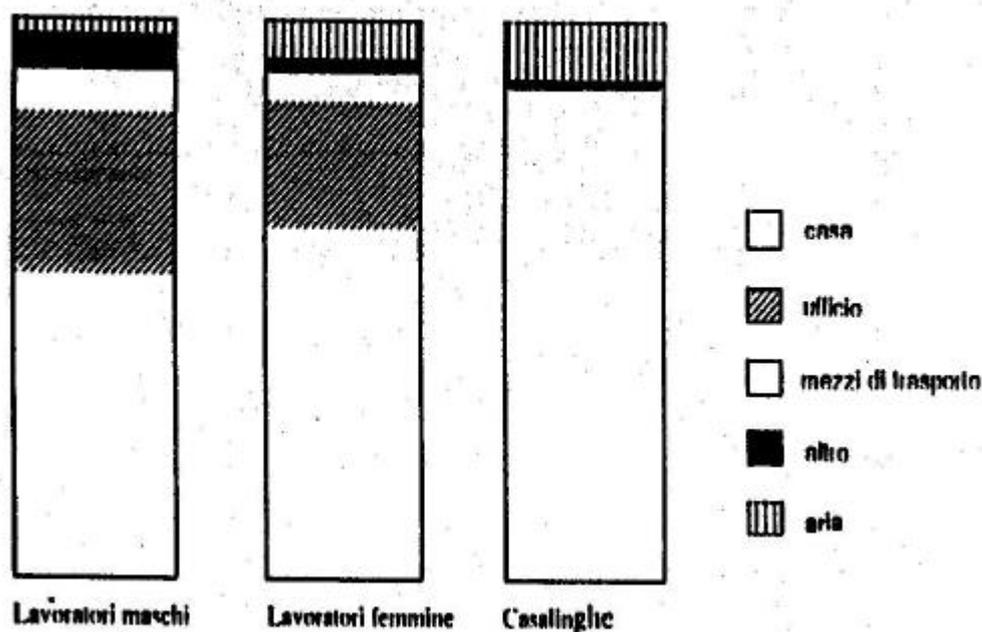
ARIA INDOOR

I primi studi sulla potenziale nocività dell'aria negli ambienti confinati sono stati condotti negli ambienti di lavoro (minerario, industriale ed agricolo, ecc.) ed il rapporto tra inquinanti lavorativi in questo settore occupazionale ed il danno respiratorio conseguente costituiscono un consolidato patrimonio culturale della Medicina del Lavoro.

Tuttavia, verso la fine degli anni '60 e l'inizio degli anni '70, un crescente interesse è andato focalizzandosi sugli ambienti confinati adibiti ad uso domestico o ad uso lavorativo per i servizi ed il terziario

(ufficio). L'interesse rivolto a questo settore dell'indoor fu motivato dalla crisi energetica dell'inizio anni settanta e dalle modificazioni di molti edifici nel senso di un risparmio energetico. Infatti l'uso di materiali isolanti ed infissi a tenuta determina una diminuzione di ventilazione e quindi un potenziale aumento degli inquinanti interni. A ciò si aggiunga il fatto che gli abitanti dei paesi più sviluppati trascorrono ben poco del loro tempo all'aperto e per contro trascorrono la maggior parte della giornata tra le mura della propria abitazione o dell'ufficio (Figura n. 1).

Figura n. 1 - Ripartizione del tempo trascorso in ed outdoor dalla popolazione adulta di 44 città americane





La concentrazione degli inquinanti indoor è determinata innanzitutto dalla concentrazione degli stessi nell'aria outdoor immediatamente circostante e per la maggior parte degli inquinanti chimici e biologici, le cui fonti di emissione principali sono all'esterno, il rapporto tra concentrazione indoor e outdoor I/O è inferiore all'unità

Tuttavia alcuni particolari contaminanti legati a materiali di costruzione o arredamento, a fonti combustibili domestiche a infestazioni o colonizzazioni microbiologiche possono presentare un rapporto I/O molto superiore all'unità

In rapporto alla loro natura, questi inquinanti a maggior concentrazione indoor possono essere suddivisi in inquinanti chimici ed inquinanti biologici. Tra i primi considereremo l'ossido di carbonio, gli ossidi di azoto, la formaldeide con i composti organici volatili ed il radon, tralasciando i problemi legati al fumo di tabacco, che meriterebbero troppa ampia trattazione proprio perché la miscela tabacco assomma e congloba anche gli effetti chimici della maggior parte degli inquinanti che verranno trattati. Tra i secondi gli allergeni derivanti dagli acari e dagli animali domestici, i batteri, i funghi ed i virus.

Ambiente domestico

Gli ambienti domestici maggiormente a rischio per la qualità dell'aria interna sono, naturalmente, quelli "sigillati", peraltro ancora poco frequenti in Italia. Altri tipi di case a rischio, anch'esse peraltro di scarsa utilizzazione in Italia ma frequenti in altri paesi, sono le case prefabbricate, le case mobili o le costruzioni in legno, sia per i materiali propri da costruzione, sia per le dimensioni di solito ridotte, che creano notevoli problemi di ventilazione.

Nell'ambiente domestico sono riconoscibili la gran parte delle sorgenti listate nella seguente tabella.



Tabella n. 1 - Principali sorgenti degli inquinanti dell'aria negli ambienti confinati

FONTI	AGENTI
materiali da costruzione	radon, asbesto, fibre minerali
materiali di rivestimento	composti volatili organici, contaminanti biologici
arredamento	formaldeide, composti volatili organici
rivestimenti in legno	pentaclorofenolo, altri antiparassitari
materiali isolanti	asbesto, fibre minerali, composti volatili organici
apparecchi per la combustione	gas (NO _x , SO _x , CO, CO ₂) idrocarburi policiclici
prodotti per la pulizia	composti volatili organici, fluorocarboni
impianti di condizionamento	batteri, funghi, virus
persone, animali domestici, piante	batterie, funghi, virus, pollini bioescrementi antiparassitari
fumo di sigaretta	gas, idrocarburi policiclici, particelle respirabili, composti volatili organici
acqua	cloro, radon, composti volatili organici
aria esterna	particelle, gas, contaminanti biologici, antiparassitari
fotocopiatrici	polveri, composti organici, O ₃

Le principali sorgenti di combustione sono il fumo di tabacco, le cucine e i forni a gas, gli scaldabagni, le stufe a cherosene non ventilate. La combustione durante le operazioni di cottura e la combustione delle fiammelle "pilota", ad esempio degli scaldabagni o delle caldaie per il riscaldamento cosiddetto "autonomo", libera ossidi di azoto (NO_x), ossido di carbonio (CO), anidride carbonica e acqua. Il fumo di tabacco libera nell'aria dell'ambiente una miriade di composti chimici in forma gassosa e particolata e in particolare nicotina, idrocarburi aromatici policiclici, CO, acroleina, NO_x e altre sostanze potenzialmente pericolose.



I livelli nell'aria di queste sostanze dipendono dal numero dei fumatori, dal numero di sigarette fumate e dall'uso di apparecchi per la depurazione dell'aria.

Tra i fattori chimici, un inquinante che assume particolare rilievo in ambiente domestico è la formaldeide, che fa parte dell'ampio capitolo dei composti organici volatili (VOC) e che deriva, in questa sede, da numerose sorgenti: mobili, laminati in formica, adesivi, carta, tessuti e materiali isolanti, moquette. Concentrazioni particolarmente elevate derivano dalla presenza nelle sorgenti della cosiddetta "UFFI", una resina usata come indurente e costituita da urea, formaldeide e acqua. Altre quantità di VOC, e di formaldeide in particolare, vengono liberate dai prodotti utilizzati per le pulizie.

Accanto ai fattori chimici, diversi fattori biologici concorrono a inquinare l'aria nelle case. Fra essi un ruolo particolare spetta agli Acari presenti nella polvere di casa e ai derivati di animali domestici, quali il gatto o il cane. Ad essi possono aggiungersi gli agenti batterici o fungini in grado di proliferare negli impianti di aria condizionata creando pericolosi bioaerosol.

L'azione nociva dei fattori chimici e dei fattori biologici si può associare o potenziare a vicenda, creando effetti sinergici o di sommazione sulla salute.

Uffici

Negli ultimi due decenni il lavoro di ufficio ha fatto registrare in Italia una straordinaria diffusione tanto che il terziario occupa il 58,48% dei lavoratori (circa 10 milioni di persone). Al lavoro di ufficio sono assimilabili attività varie: trasporti, imprese di pulizia, parte della sanità alcuni settori dei rami primario e secondario, in rapporto alla crescita delle macchine a base informatica. Parallelamente alla crescita di tale



tipo di attività nei paesi a sviluppo socio economico più avanzato è cresciuta la domanda di salute e sicurezza e lo stesso concetto di salute si è modificato intendendosi attualmente con questo termine non soltanto l'assenza di malattia ma anche un sufficiente livello di benessere ovvero di qualità della vita. La progettazione degli uffici moderni ha quindi tenuto conto sia delle esigenze già menzionate di risparmio energetico, sia anche della richiesta di ambienti confortevoli, e quindi con condizionamento centrale dell'aria e con arredo e suppellettili costruite con materiali tecnologicamente avanzati.

Tutte queste caratteristiche, peraltro, concorrono a creare all'interno di queste strutture problemi di inquinamento dell'aria. In particolare gli elementi di arredo sono sorgenti di inquinanti chimici come formaldeide e VOC, mentre gli impianti di aria condizionata o la moquette possono essere fonti di rischi biologici. A questi rischi si assommano il fumo di tabacco e gli inquinanti, soprattutto VOC, derivati da materiali specificamente utilizzati nel lavoro d'ufficio, quali oggetti di cancelleria, carte autocopianti, reagenti chimici presenti nei toners delle fotocopiatrici ecc., che si configurano quasi come rischi "specifici" di questa attività lavorativa. A ciò vanno aggiunti per gli uffici posti in strutture industriali, eventuali rischi "di posizione" derivanti dalla localizzazione dell'ufficio nello stesso ambiente ove si svolge l'attività produttiva. Nell'ambiente d'ufficio, i rischi chimici si assommano a rischi fisici, quali quelli derivanti dalla illuminazione artificiale o dai videoterminali. Infine, va ricordato come proprio negli uffici sia stata descritta quella particolare forma patologica chiamata "sick building syndrome", descritta più avanti in apposito capitolo, che non sembra riconoscere alla sua base un rischio specifico ma un'assommarsi di diversi fattori fisici, chimici, biologici e psicologici.

Mezzi di trasporto



Le persone trascorrono circa il 5% di ogni giornata su mezzi di trasporto, principalmente automobili, ma anche autobus, treni o aerei. La qualità dell'aria sui mezzi di trasporto dipende essenzialmente dalle dimensioni e dal numero degli occupanti, oltreché dalla ventilazione naturale o meccanica, e i problemi sono quindi diversi a seconda che si tratti di automobili private o di mezzi pubblici. I maggiori rischi in questo settore derivano comunque dalla combustione dei motori, dal fumo di tabacco e dagli impianti di aria condizionata. Sui jet supersonici la cabina può essere contaminata anche dall'ozono stratosferico.

EFFETTI SULLA SALUTE

La relazione tra esposizione a inquinanti ambientali ed effetto o malattia si estrinseca in un ampio spettro di conseguenze (Figura n. 2): effetti fisiologici o parafisiologici, effetti patologici, morte. Come detto più sopra, negli ambienti confinati non industriali i fattori inquinanti, nel loro complesso, sono presenti per lo più in concentrazioni tali da non determinare gli effetti acuti che si manifestano come conseguenze dei livelli eccezionalmente elevati ma che sono tuttavia causa di effetti negativi sulla salute dell'uomo.

Figura n. 2 - Relazione tra esposizione ad inquinanti ambientali e malattia



La identificazione degli effetti sulla salute dei livelli di inquinamento (Tabella n. 2) outdoor e "indoor" ha conseguenze non solo medico-igienistiche sulle popolazioni ma anche importanti ripercussioni socioeconomiche.

Tabella n. 2 - Valori limite di sostanze inquinanti ammessi dall'E.P.A. per l'aria esterna e concentrazioni rilevabili indoor

Inquinante	Valori indoor	Valore limite outdoor*	Tempo medio di esposizione
SO ₂	1000	365 (0,14 ppm)	24 ore; può essere superato una volta all'anno
	15	80 (0,03 ppn)	1 anno
Polveri totali	1000	260	24 ore; può essere superato una volta all'anno
	10	75	1 anno
CO	100**	40** (35 ppm)	1 ora; può essere superato una volta all'anno
	5**	10** (9 ppm)	1 ora; può essere superato una volta all'anno
O ₃	40-400	235 (0,12 ppm)	1 ora; può essere superato una volta all'anno
NO ₂	200-1000	100 (0,05 ppm)	1 anno



Formaldeide	20-200	150	1 anno
-------------	--------	-----	--------

* espressi in microgrammi per metro cubo

** espressi in milligrammi per metro cubo

Gli inquinanti dell'aria agiscono prevalentemente sull'apparato respiratorio che è la prima via di contatto e di assorbimento, in quanto un individuo inala quotidianamente da 10 a 20.000 l di aria al giorno (mentre introduce 'soltanto' 3 l di liquidi e 1,5 Kg di cibo). Alcuni inquinanti chimici possono agire come irritanti primari delle vie aeree, altri, dotati di elevato potere ossidante (ozono o ossidi di azoto), possono determinare un abbassamento della soglia di reattività bronchiale aspecifica attraverso l'induzione di un processo infiammatorio. Sia le noxae chimiche che le noxae biologici sono in grado di interagire con il sistema immunitario potenziandone o sopprimendone la risposta. Nel primo caso, appannaggio soprattutto dei fattori di rischio biologico ad alto peso molecolare che si comportano come antigeni, sono riscontrabili patologie allergiche, quali asma, rinite e alveolite allergica estrinseca. Nel secondo caso (immunodepressione) le conseguenze può essere una aumentata suscettibilità ad agenti infettivi o una ridotta sorveglianza antitumorale; va tuttavia sottolineato che, alla luce delle conoscenze attuali, benché molte sostanze possano essere chiamate in causa al riguardo, i dosaggi necessari sono molto superiori a quelli riscontrabili nelle abituali condizioni di vita. Infine, negli ultimi anni è emersa la possibilità di una interazione fra inquinanti chimici e inquinanti biologici nel determinismo di patologie respiratorie. E' stato chiaramente dimostrato nell'animale che le particelle di scarico dei motori diesel agiscono come adiuvanti potenziando la risposta delle immuno globuline ai comuni allergeni. Indagini epidemiologiche eseguite recentemente in Giappone suggeriscono una simile azione nell'uomo. Un simile meccanismo di interazione fra inquinanti chimici e inquinanti biologici è suggerito anche per l' SO_2 nell'ambiente esterno e potrebbe essere implicato anche nelle patologie respiratorie correlate agli ambienti interni.



Le patologie descritte in ambienti confinati non industriali sono distinguibili in due categorie:

- 1) patologie che si manifestano in uno o più occupanti di un edificio e che possono essere riferite ad uno specifico fattore eziologico presente nell'aria dell'ambiente confinato;
- 2) sick-building syndrome o sindrome dell'edificio malato, che colpisce la maggioranza degli occupanti di un edificio, si manifesta con sintomi aspecifici ma ripetitivi e non riconosce un agente eziologico specifico.

Tra le prime a seconda dei fattori eziologici e dei meccanismi in causa si possono distinguere patologie:

- a) da agenti tossici o irritanti;
- b) da ipersensibilità allergiche;
- c) da agenti infettivi;
- d) da carcinogeni.

PATOLOGIE DA AGENTI TOSSICI O IRRITANTI

Fra gli inquinanti "indoor" dotati di azione tossica o irritante cinque composti si segnalano frequentemente per la loro presenza in concentrazioni superiori ai valori limite consigliati: biossido di azoto (NO_2), ossido di carbonio (CO), ozono (O_3), formaldeide e radon (Tabella n. 2). I primi quattro hanno un'azione prevalentemente tossica od irritante, mentre il radon possiede, come molti radionuclidi, un sicuro effetto cancerogeno.

Radon

Il radon 222 è un isotopo radioattivo che deriva dalla catena di decadimento dell'uranio 238, attraverso il radio 226. La sua nocività è



collegata ad alcune proprietà chimico fisiche:

- 1) ha un tempo di dimezzamento lungo (3,8 giorni);
- 2) libera dal suo decadimento 2 isotopi del polonio che emettono radiazioni alfa, a breve tempo di dimezzamento ma in grado di irradiare l'apparato respiratorio;
- 3) è contenuto ubiquitariamente nel terreno e nelle rocce;
- 4) è un gas che può facilmente diffondere.

La maggior incidenza di carcinoma broncopolmonare nei lavoratori delle miniere di uranio, in rapporto alla loro esposizione al radon è stata dimostrata in classici studi, ancorché non sia stata chiaramente stabilita una correlazione con un ben preciso oncotipo né chiarita l'importanza dell'associazione con il fumo di sigaretta. Tuttavia, al di fuori dell'ambiente lavorativo minerario, l'impatto di questo isotopo sulle persone esposte resta pieno di interrogativi.

L'ipotesi che la permanenza in ambienti domestici, costruiti su terreni o con materiali ricchi di quest'isotopo, potesse parimenti favorire l'insorgenza del carcinoma broncopolmonare parte dalla constatazione che il rischio oncogeno nei lavoratori minerari è chiaramente rilevabile per esposizioni 2-5 volte superiori a quelle medie che la popolazione subisce in ambienti chiusi.

Ossidi di azoto

Il biossido di azoto può raggiungere all'interno delle abitazioni concentrazioni di gran lunga superiore a quelle ammesse ed a quelle dell'ambiente esterno, dove si ritrova perché emesso con i gas di scarico degli autoveicoli. Già noto per causare danni polmonari ad alte concentrazioni, NO_2 sembra essere in grado di provocare, almeno nel bambino e a basse concentrazioni, un aumento dei sintomi respiratori e/o delle patologie respiratorie. NO_2 può danneggiare il polmone



direttamente attraverso il suo potere ossidante o indirettamente, aumentando la suscettibilità alle infezioni agendo probabilmente sul sistema immunitario.

Alla fine degli anni '70 si iniziò a porre attenzione al fatto che fonti di emissione domestiche di questo gas potessero innalzare i valori indoor al di sopra di quelli outdoor: queste fonti sono essenzialmente rappresentate dalla combustione del gas durante la cottura dei cibi e dalla combustione delle caldaie domestiche a gas e cherosene.

Numerosi studi epidemiologici sono stati quindi condotti per evidenziare un eventuale eccesso di sintomi e danni funzionali respiratori nella popolazione esposta a fonti di inquinamento indoor.

Un primo studio epidemiologico condotto in Gran Bretagna, su due coorti di scolari, evidenzia che i ragazzi, nelle cui case erano presenti cucine a gas, presentavano una prevalenza di sintomi respiratori maggiore rispetto ai ragazzi nella cui abitazione era presente una cucina elettrica.

Tuttavia, seguendo longitudinalmente i due gruppi, il rischio relativo associato alle cucine a gas diminuì progressivamente con il crescere dell'età dei ragazzi; inoltre, in questi casi in cui fu valutata la concentrazione di NO₂ domestica, la correlazione tra alte concentrazioni e prevalenza di sintomi respiratori risultò ai limiti della significatività statistica.

Anche gli studi epidemiologici americani presentano dati controversi: è stata trovata una significativa preponderanza di sintomi respiratori nei ragazzi esposti a cucine a gas, solo se in presenza di parenti fumatori all'interno dell'abitazione, seguendo nel tempo l'incidenza delle riacutizzazioni respiratorie, non hanno evidenziato differenze in rapporto al tipo di stufa usata; anche gli studi miranti ad accertare alterazioni funzionali e respiratorie nei ragazzi esposti a cucina o riscaldamento a gas sono risultati controversi.

Pochi studi epidemiologici sono stati invece condotti sugli effetti



acuti o cronici del NO₂ domestico in popolazioni adulte.

Pertanto, in ultima analisi, i dati riguardanti il rapporto tra l'esposizione al NO₂ domestico e le malattie respiratorie permangono controversi: in particolare sembra che gli effetti conseguenti all'esposizione normalmente presenti nelle abitazioni studiate siano poco evidenti e talora trascurabili.

Ossido di carbonio (CO)

L'intossicazione da CO costituisce un problema per la razza umana fin dall'epoca in cui i nostri progenitori iniziarono ad accendere fuochi nelle loro grotte o nei loro rifugi poco ventilati. Tuttavia i combustibili usati in era pre-industriale, sebbene producessero una notevole quantità di CO, si accompagnavano a emissioni di gas irritanti, in grado di mettere in allarme circa l'esposizione pericolosa.

I combustibili attuali consentono l'emissione inavvertita di notevoli quantità di CO incolore ed inodore che, a dosi basse di 15-85 p.p.m. (corrispondenti al 2-5% di carbossi-emoglobina ridotta) possono determinare cefalea, malessere e disturbi neurologici ma a dosi superiori a 200-700 p.p.m. (corrispondenti ad oltre il 32% di carbossi-emoglobina) portano alla perdita di coscienza e alla morte in pochi minuti. Occorre in tal proposito ricordare che la concentrazione 1 p.p.m. di CO comporta la formazione dello 0,16% di COHb.

Da una recente revisione di tutte le intossicazioni mortali da CO negli Stati Uniti dal 1979 al 1988 deriva che circa la metà (46,1%) sono dovute a suicidi, il 27,6% ad incidenti non intenzionali e il 20,6% a gravi incendi di edifici.

Il 57% degli incidenti non intenzionali sono dovuti ad emissioni di gas dalle autovetture. Tuttavia l'entità delle morti dovute ad intossicazione da CO è notevolmente diminuita da 1.513 nel 1979 a 878 del 1988.



Questo dato è da attribuire al notevole miglioramento nelle emissioni degli autoveicoli e dalle norme di sicurezza sulle cucine e sui riscaldamenti domestici.

L'esposizione a basse concentrazioni di CO, quali si possono riscontrare in ambienti domestici, sembrerebbero giocare un certo ruolo, per altro molto controverso, in alcune patologie cardiovascolari e polmonari. Ad alte concentrazioni, invece, il CO, legandosi con l'emoglobina, porta alla formazione di carbossiemoglobina e sposta verso sinistra la curva di dissociazione dell'ossiemoglobina, interferendo con il trasporto di ossigeno ai tessuti. Questo effetto è ben noto ed è responsabile delle molte morti accidentali che avvengono ogni anno per il malfunzionamento di impianti di combustione ad uso domestico. In ogni caso la World Health Organization ha da poco introdotto un valore limite di concentrazione di CO di $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (9 p.p.m.) per proteggere gli occupanti degli ambienti confinati dagli eventuali effetti provocati anche da basse concentrazioni nell'aria ambiente di questo gas inodore e incolore.

Ozono

L'ozono è il prodotto di reazioni fotochimiche di alcuni precursori, tra i quali ossidi di azoto e idrocarburi. O_3 costituisce quindi uno degli inquinanti maggiori delle aree urbane, soprattutto nelle regioni più soleggiate.

L'ozono può inoltre indurre un processo infiammatorio delle vie aeree, in grado di aumentare la reattività bronchiale.

Formaldeide e composti organici volatili (V.O.C.)

Formaldeide



Numerose fonti di rilascio di formaldeide possono essere presenti nelle attuali abitazioni, indipendentemente dal fumo di tabacco che ne costituisce una sorgente non indifferente. Le più importanti sono: le tappezzerie, gli adesivi, i materiali stampati, i mobili verniciati o laccati, le resine o i cosmetici ecc.

Altissime concentrazioni di formaldeide sono presenti in alcune resine contenenti inoltre urea ed acqua (urea formaldehyde foam insulation-UFFI) usate nella costruzione di molti edifici soprattutto negli Stati Uniti.

Indipendentemente dagli ambienti di lavoro i primi studi epidemiologici riguardanti la formaldeide furono appunto condotti sulle abitazioni nelle quali erano state usate queste resine. In studi epidemiologici eseguiti nel Connecticut e nel New Jersey è stata evidenziata una significativa ricorrenza di irritazione nasale ed oculare e difficoltà di respiro nei soggetti che risiedevano in queste abitazioni in cui i livelli di formaldeide erano elevati.

Un ulteriore modello di studio fu rappresentato dalle case mobili o prefabbricate, nelle quali molti dei materiali usati per costruirle liberano formaldeide. Anche in questo caso la maggior parte degli studi eseguiti ha evidenziato una significativa prevalenza di sintomi irritativi della mucosa oculare e respiratoria rispetto ai controlli.

Tuttavia, se danni respiratori e oculari sono senz'altro associati alla permanenza in case mobili o costruite con materiali in grado di liberare alte concentrazioni di formaldeide, molti dubbi permangono circa la possibilità che simili problemi occorranza in abitazioni tradizionali, in cui i livelli di formaldeide sono decisamente più bassi.

Parimenti molti dubbi esistono circa le proprietà carcinogenetiche della formaldeide. Infatti esperimenti sugli animali eseguiti alla fine degli anni '70, evidenziarono la possibilità di insorgenza di carcinomi nasali dopo esposizioni prolungate alla formaldeide.



In merito a questo argomento sono stati condotti molti studi epidemiologici su lavoratori esposti alla formaldeide; tuttavia le segnalazioni di un aumento dei casi di cancro nel naso o della bocca contrastano con altre osservazioni nelle quali nessuna differenza significativa è stata osservata rispetto ai controlli.

Da questi dati epidemiologici si può desumere i danni irritativi da formaldeide sono senz'altro presenti negli ambienti indoor in cui vi siano alti livelli di questo composto ma molto dubbi nella maggior parte delle abitazioni tradizionali; la carcinogenicità da formaldeide risulta tuttora controversa anche negli ambienti di lavoro con alti livelli della stessa.

Composti organici volatili (V.O.C.)

I composti organici volatili costituiscono un gruppo di sostanze organiche di natura chimica differente, capaci di diffondere a temperature normali nell'aria dell'ambiente.

Di questi la formaldeide costituisce il composto di maggior interesse generale ma oltre 300 diversi composti chimici sono stati attualmente identificati. Analogamente alla formaldeide questi composti possono essere presenti nelle abitazioni, negli uffici, nei materiali di costruzione, nei mobili, negli adesivi, nella carta stampata e nei cosmetici. Molti studi ambientali hanno evidenziato alti livelli di V.O.C. indoor non solo in ambienti industriali ma anche negli uffici e nelle abitazioni domestiche.

Studi sperimentali di esposizione acuta hanno rivelato come le conseguenze principali consistano in percezioni di odori sgradevoli e nell'infiammazione delle mucose oculare e respiratoria. Tuttavia valutazioni epidemiologiche degli effetti cronici sulla salute respiratoria



sono estremamente difficoltose per l'alto numero di questi composti e la loro variabilità nel tempo.

PATOLOGIE DA IPERSENSIBILITA'. INQUINANTI BIOLOGICI

I fattori di rischio allergologico negli ambienti confinati sono inquinanti biologici aerodiffusi, come Acari, scarafaggi, animali domestici, spore fungine, piante ornamentali, e sostanze varie, come ad esempio componenti per mangimi per pesci di acquario. L'inalazione di questi fattori biologici provoca patologie diverse.

Gli inquinanti biologici aerodiffusi più conosciuti e meglio caratterizzati sono gli Acari e in particolare i Dermatofagoidi presenti nella polvere di casa.

La loro responsabilità nello scatenamento dell'attacco asmatico acuto, quando inalati ad alte dosi, rappresenta un dato consolidato e riproducibile nell'uomo mediante test di provocazione specifico. Tuttavia le dosi di allergene normalmente presente nell'aria sono di gran lunga inferiori a quelle usate nei test di provocazione bronchiale. Lo studio epidemiologico riguardante il ruolo etiopatogenetico dei dermatofagoidi si incentra essenzialmente nella risposta a due interrogativi:

- a) quale ripercussione abbiano i livelli ambientali di dermatofagoide nel determinismo del grado di sensibilizzazione allergica delle popolazioni esposte;
- b) analogamente, quanto incidano i livelli ambientali di dermatofagoide nello sviluppo di iperreattività ed asma bronchiale nelle popolazioni esposte.

Uno studio caso-controllo danese dimostra come la presenza di un numero di acari superiore a 100/grammo polvere costituisca un fattore di rischio maggiore di asma. Simili risultati sono stati ottenuti da studi



analitici, condotti in varie parti del mondo, da cui emerge inoltre la possibilità di variazioni stagionali del livello acaridico cui conseguono nel tempo variazioni dell'entità del fattore di rischio.

La loro crescita è largamente condizionata dall'umidità ed è massima fra il 60 e l'80% di umidità relativa, mentre minore importanza ha la temperatura. L'habitat preferenziale è rappresentato dai materassi e dai mobili imbottiti, ma in condizioni di umidità relativa ambientale interna molto elevata essi proliferano anche in tappeti, mobili e abiti.

Studi longitudinali prospettici, condotti in Nuova Guinea, hanno segnalato un drammatico incremento della prevalenza dell'asma bronchiale dallo 0,5% al 7,3%, dopo l'introduzione nelle abitazioni delle coperte, dalle quali deriva un notevole incremento di acari indoor.

Nei Dermatofagoidi sono stati identificati due gruppi di allergeni, il Der I associato alle deiezioni e il Der II associato al corpo. Gli allergeni del gruppo I (Der I) sembrano avere un maggiore potere allergenico. Il livello allergenico di un ambiente non è unicamente determinato dal numero di Acari, ma dagli allergeni veicolati dagli escrementi o liberati dai corpi degli Acari morti. Per questo, pur avendo il numero degli Acari delle variazioni stagionali (nella maggior parte dei Paesi europei comincia a crescere in maggio/giugno ed è massimo in settembre/ottobre) è stato dimostrato che ad esempio nella polvere presente sui divani i livelli allergenici possono rimanere elevati fino a gennaio, probabilmente perché in questo habitat gli Acari trovano parametri microclimatici adatti per continuare la proliferazione e vi si accumulano i corpi morti e gli escrementi.

Per gli Acari una quantità di 2 μ g per grammo di polvere di allergeni del Gruppo I, equivalente a 100 Acari per grammo, è considerata la concentrazione a rischio per lo sviluppo di sensibilizzazione, mentre 10 μ g/g di polvere (o 500 Acari per grammo) sono la quantità ritenuta sufficiente per scatenare un attacco acuto di asma nei soggetti sensibilizzati. Le misure di bonifica ambientale per questi inquinanti



devono quindi essere volte a contenere i livelli allergenici al di sotto della soglia di sensibilizzazione.

Accanto alla patologia da Acari, negli ultimi anni vi è stato un aumento delle segnalazioni in letteratura riguardanti manifestazioni allergiche respiratorie dovute agli scarafaggi. Queste segnalazioni provengono soprattutto dagli Stati Uniti, dove è interessante notare che tali patologie si presentano in tutte le classi sociali, ma recentemente sono stati riportati dati anche dall'Europa, in particolare dalla Francia, e dall'Asia. Da prime indagini preliminari, invece, in Italia tale patologia non sembra essere rilevante.

Il problema delle manifestazioni allergiche agli animali domestici si pone soprattutto per i cani e i gatti, anche se alcuni roditori, soprattutto porcellini d'India e criceti, tenuti in casa quali cuccioli, possono, in casi particolari, essere rilevanti. Per quanto riguarda il gatto, gli allergeni responsabili sembrano essere localizzati soprattutto sul pelo e sulla saliva.

Uno degli allergeni maggiori del gatto, denominato Fel D I, sembra essere associato a particelle di dimensioni molto piccole, inferiori a 2,5 μ di diametro, che restano a lungo in sospensione nell'aria e sono in grado di penetrare rapidamente e in dosi massicce nelle vie aeree. Ciò condiziona l'insorgenza di subitanee crisi asmatiche nei soggetti allergici non appena essi entrano in un ambiente con un gatto. Ciò non avviene invece per gli Acari, i cui allergeni principali sono presenti sulle particelle fecali di diametro molto maggiore (10 o più μ) e quindi con capacità di penetrazione polmonare molto ridotta (circa il 5-10%).

Un'altra sorgente di rischio di patologia allergica in ambienti confinati sono alcune piante ornamentali, come il Ficus benjamina, anche se le segnalazioni presenti in letteratura riguardano solo la patologia occupazionale. Naturalmente non va dimenticato che si possono trovare nell'aria degli ambienti confinati concentrazioni polliniche significative derivanti dai pollini presenti nell'atmosfera.

PATOLOGIE DA AGENTI INFETTIVI

E' ben noto come le malattie infettive si trasmettano più facilmente ed in modo epidemico negli ambienti chiusi, soprattutto dove convivano molte persone a stretto contatto, piuttosto che all'aperto, dove gli agenti patogeni hanno modo di disperdersi e di subire l'azione degli agenti atmosferici e dei raggi UV. Inoltre gli impianti di condizionamento possono costituire un pabulum e/o un mezzo di dispersione per alcuni agenti infettivi, tra cui virus influenzali, del morbillo, il Mycobacterium tuberculosis, e alcuni batteri e miceti tra cui, soprattutto, la Legionella pneumophila. La prima grave epidemia di polmoniti acute mortali causate da questo agente venne descritta nel 1976 a Philadelphia durante un convegno della Legione Americana, da cui la denominazione di "malattia dei legionari" con cui queste patologie sono conosciute. Successivamente, altre epidemie sono state descritte in ospedali ed in uffici sempre situati in edifici con impianti di aria condizionata centralizzata. Il batterio è stato isolato nell'acqua degli impianti di aria condizionata degli edifici i cui occupanti erano stati colpiti.

Altri contaminanti dell'acqua di tali impianti responsabili di gravi forme invasive broncopolmonari che interessano soprattutto soggetti immunocompromessi e ospedalizzati sono miceti del genere Aspergillus.

SICK BUILDING SINDROME

Gli impianti di ventilazione meccanica dell'aria, introdotti pionieristicamente negli USA ai primi del secolo da WH Carrier allo scopo di migliorare il comfort negli ambienti, hanno avuto da allora un



grande successo ed il loro impiego si è diffuso in tutto il mondo soprattutto negli edifici costruiti per le attività del terziario. Tuttavia dai primi anni '70 ci si è resi conto che una parte degli edifici con impianti centralizzati di condizionamento potevano anche essere associati a situazioni di malessere vere e proprie manifestantisi nella gran parte degli occupanti. Nell'esperienza nord-americana, che è a tutt'oggi la più ricca, la tipologia di questi edifici è stata chiaramente definita come quella delle già descritte costruzioni "sigillate" caratterizzate da scarsa ventilazione e ricircolo dell'aria, filtrazione inadeguata e scarsa pulizia dell'impianto di ventilazione/condizionamento. Tuttavia, l'attenzione posta alla relazione tra qualità dell'aria negli ambienti interni e salute dell'uomo ha portato alla descrizioni di sensazioni soggettive di malessere nella gran parte degli occupanti anche in edifici ventilati naturalmente. In questo caso gli edifici "malati" sono più caldi, più affollati, hanno una cattiva disposizione degli spazi e più tessuti, più tappeti, più scaffali a vista, sono più sporchi degli edifici "sani" e fra gli occupanti vi è un maggior numero di fumatori.

E' stata quindi descritta una vera e propria sindrome, chiamata, nei diversi Paesi, "sindrome dell'edificio malato" ("sick building syndrome", USA), "sindrome dell'edificio sigillato" ("tight building syndrome", USA), "problemi legati al clima in ambienti confinati" ("indoor climate problems", Paesi Scandinavi), "malattia degli edifici malsani" ("maladie des bâtiments malsains", Francia), "malattia dei palazzi ad uffici" ("maladie des tours à bureaux", Canada), che definisce le patologie correlate con il lavoro in edifici malati. si tratta di un gruppo di sintomi che si riscontrano facilmente in tutta la popolazione ma che sono prevalenti in alcuni edifici piuttosto che in altri. La sick building syndrome colpisce la maggioranza degli occupanti e si manifesta con sintomi aspecifici ma ripetitivi e non riconosce un agente eziologico specifico.

La sintomatologia che viene riferita è del tutto aspecifica (irritazione degli occhi, delle prime vie aeree e della cute, tosse, senso di costrizione toracica, sensazioni olfattive sgradevoli, nausea, torpore,



sonnolenza, cefalea, astenia) ed è cronologicamente associata alla permanenza nell'edificio. Tali sintomi si manifestano in un'elevata percentuale di soggetti che lavorano nell'edificio (in genere superiore al 20%), si risolvono o si attenuano dopo l'uscita e non sono accompagnati da reperti obiettivi rilevanti. Proprio l'assenza di reperti obiettivi focalizza il problema sulla adeguatezza della qualità dell'aria, intesa come soddisfacimento delle proprie aspettative e raggiungimento di uno stato di benessere. Infatti è difficile poter affermare che vi sia una vera e propria "malattia" causata dalla permanenza in edifici malati, mentre è certo che vi si può avvertire malessere e senso di irritazione. Il giudizio espresso dagli occupanti è quindi l'unico modo per avere informazioni relative al comfort e ai sintomi aspecifici della sick building syndrome.

Il giudizio relativo alla "salubrità" di un edificio e quindi, in ultima istanza, ai rischi di sick building syndrome, può essere espresso in due modi: valutando la concentrazione degli inquinanti e il grado di ventilazione o indagando, ad esempio tramite questionari, l'opinione degli occupanti. Lo studio degli inquinanti dell'aria presenti all'interno di un edificio, per quanto utile, spesso fornisce notizie significative: possono essere rilevate numerose sostanze chimiche aerodisperse in concentrazioni bassissime il cui effetto considerato singolarmente è ininfluenza ma la cui sommatoria fa sì che l'aria risulti irritante, stantia e opprimente. In ogni caso, le informazioni relative alla composizione chimica dell'aria non possono dare alcuna indicazione su come l'aria sarà percepita dai soggetti che la respirano, così come l'analisi degli ingredienti non assicura che una pietanza risulti gradevole al palato. Lo screening sul comfort e sui sintomi tramite questionario fornisce invece più elementi per individuare la percentuale di soddisfazione necessaria per giudicare "confortevole" un edificio. Va ricordato, peraltro, che il benessere è uno stato soggettivo o una condizione mentale che difficilmente può essere razionalizzato e che dipende non soltanto dalla qualità dell'aria respirata ma dall'azione combinata degli agenti fisici, quali



la temperatura, l'umidità relativa, la velocità dell'aria, la temperatura delle superfici radianti e di fattori psicologici. Non possono essere neppure trascurati il tipo di attività svolta nell'ambiente, quale ad esempio l'uso continuato di videotermini, e il grado di inquinamento acustico.

Studi tesi ad individuare le cause della sick building syndrome hanno tuttavia evidenziato come la sintomatologia sia più frequente negli edifici dotati di un sistema di condizionamento e/o ventilazione forzata, di un ambiente termico omogeneo e di sistemi tendenti a limitare gli scambi con l'aria esterna.

Come cause sono stati indicati, di volta in volta, fattori diversi quali il basso numero di ricambi d'aria, l'insufficiente apporto di aria fresca, la bassa umidità relativa, l'eccessiva temperatura, il fumo di sigaretta, la presenza di composti organici volatili (VOC) e in particolare di formaldeide, la carenza di ioni negativi, l'azione di microrganismi aerodispersi, di endotossine e micotossine, o, ancora, fenomeni d'isteria di massa. Recentemente sono stati valutati anche il ruolo dei fattori ergonomici e dello stato atopico. Tuttavia, nonostante tutte le ipotesi ed i tentativi di ricerca, la causa di questa sindrome deve ancora essere individuata, anche se è dimostrato che negli edifici dove vi è un malessere nell'ambiente di lavoro, l'aumento dell'apporto di aria fresca migliora le condizioni. Non è noto, peraltro, se l'aumento della ventilazione agisca direttamente o attraverso la diminuzione della concentrazione di alcuni inquinanti. Infine, non si può escludere che anche i livelli elevati di stress derivanti dalla incapacità di controllare le condizioni ambientali in un edificio chiuso, cattive relazioni interpersonali o altri fattori umani possano influire sulla insorgenza della sintomatologia.

CARATTERIZZAZIONE CHIMICA DEGLI INQUINANTI ORGANICI INDOOR



Un certo numero di studi iniziali su piccola scala (10-12) consentiva di concludere che la concentrazione di molti composti organici nell'aria di ambienti confinati risultava superiore a quella dell'aria esterna. I dati però erano insufficienti a permettere una accurata valutazione dei livelli di esposizione da parte della popolazione. Nel 1986 veniva pubblicata una compilazione di 307 VOC identificati nell'aria di ambienti confinati da parte di autori di differenti Paesi.

Nel corso degli ultimi anni, le conoscenze riguardo alla presenza dei composti organici nell'aria indoor sono aumentate notevolmente poiché in differenti Paesi è stato condotto un buon numero di studi diversi. Quelli sviluppati nella Repubblica Federale di Germania (6-14), in Italia (7), in Olanda (8), negli Stati Uniti (9) ci hanno illustrato le concentrazioni indoor di una moltitudine di diversi VOC in un numero di abitazioni tanto elevato da metterci in grado di effettuare stime di esposizione per la popolazione nel suo complesso.

Le indagini sul campo intraprese per determinare la distribuzione di frequenza delle concentrazioni di inquinanti organici indoor o delle esposizioni delle popolazioni, abitualmente non prendono in considerazione l'intera gamma di inquinanti organici indoor ma li frazionano, suddividendoli in composti organici "volatili" e "semivolatili". Poiché per tali frazioni non esiste alcuna definizione documentata, si è classificata l'intera gamma di inquinanti organici indoor suddividendoli in 4 gruppi come indicato nella seguente tabella.

Tabella n. 3 - **Classificazione degli inquinanti organici indoor**

Categoria	Descrizione	Abbreviazioni	Range dei punti di ebollizione (°C)*	Metodi di campionamento usati comunemente negli studi sul campo
1	Composti organici molto volatili (gas)	VVOC	Da <0 a 50-100	Campionamento in massa: assorbimento su



				carbone
2	Composti organici volatili	VOC	Da 50-100 a 240-260	Adsorbimento su Tenax, carbon molecular <i>black</i> o carbone
3	Composti organici semivolatili	SVOC	Da 240-260 a 380-400	Adsorbimento su schiuma di poliuretano o XAD 2
4	Composti organici associati con materiali corpuscolati o con materiali organici corpuscolati	POM	>380	Raccolta su filtri

* I composti polari compaiono all'estremità superiore del *range*

I Gruppi o categorie sono stati definiti come classi in base ai punti di ebollizione, nonostante fra le 4 categorie considerate non esistano limiti drastici. La ragione di ciò è costituita dal fatto che in pratica le categorie vengono determinate o definite sulla base dei diversi metodi impiegati per raccogliere dall'aria gli inquinanti organici. Nella Tabella n. 3 vengono illustrati, per ogni categoria, i metodi più frequentemente applicati sul campo.

La maggior parte di questi metodi si basa sulla possibilità di intrappolare i composti organici in materiali adsorbenti come polimeri porosi, carbone, il carbon molecular black o la schiuma di poliuretano. La volatilità che è ben correlata con il punto di ebollizione, è il fattore più importante nel determinare la gamma dei composti che può essere raccolta su un determinato agente adsorbente. Il volume di campionamento (che può variare a seconda della sensibilità sperimentale richiesta, ovvero della sensibilità analitica disponibile) e le polarità dei composti influenzano la gamma delle sostanze raccolte. Ne consegue che le categorie dei composti non possono essere separate da un unico valore di punto di ebollizione. La categoria dei VOC è stata definita nella Tabella n. 3 da una gamma di punti di ebollizione che hanno un limite inferiore fra 50° C e 100° C e un limite superiore posizionato fra 240° C e



260° C, dove i valori più elevati si riferiscono a composti polari. I composti di questa categoria vengono tipicamente campionati mediante adsorbimento su carbon molecular black, carbone o sul polimero poroso Tenax.

I metodi di campionamento differiscono fra loro per quanto riguarda la strumentazione richiesta, il volume, il peso e il costo. Di conseguenza la loro applicabilità a indagini su larga scala è soggetta a limitazioni che risultano differenti per i diversi metodi e quindi per le diverse categorie di inquinanti. Pertanto, i dati di concentrazione ed esposizione degli inquinanti organici indoor stanno rendendosi disponibili per categoria. Per il momento, solo per i VOC sono disponibili dati sufficienti per una valutazione tentativa del rischio per la popolazione.

Per considerazioni di tipo analitico, alcuni composti organici non possono essere inclusi nel sopraindicato schema di classificazione. A causa della loro reattività o labilità termica, questi composti (ad esempio formaldeide e acroleina) non possono essere facilmente recuperati dagli adsorbenti o analizzati mediante gascromatografia. Per la loro individuazione e misura vengono utilizzati, quando disponibili, metodi di campionamento e analisi progettati specificamente, come il metodo della 2,4-dinitrofenilidrazina (2,4-DNPH) per i composti carbonilici.

I protocolli secondo i quali sono stati condotti i più vasti studi di campo sui VOC vengono riassunti nella tabella seguente.

Tabella n. 4 - Caratteristiche degli studi sul campo condotti su VOC in ambienti residenziali.

Studio	Periodo di campionamento	Numero di abitazioni	Numero di VOC riportati	Metodo di campionamento	Metodo analitico*
Rep. Federale di Germania	14 giorni	500	57	Piastra di carbone passivo (<i>desorption</i> CS ₂)	GC/FID-ECD
				Tenax (<i>thermal desorption</i>) 2.4-DNPH	GC/FID-ECD



Italia	4 - 7 giorni	15	35	per i composti carbonilici	Conferma mediante GC/MS HPLC per i composti carbonilici
Olanda	7 giorni	300	45	Tubo di carbone (CS ₂ desorption)	GC/FID Conferma mediante GC/MS
Stati Uniti	2 - 12 ore	355	20	Tenax (<i>therman desorption</i>)	GC/MS

* GC=gas cromatografia; MS=spettrometria di massa; FID=metodo di ionizzazione alla fiamma; ECD=*electron capture detection*; HPLC=*high performance liquid chromatography*

Uno dei fattori che appare assumere la massima influenza sulle concentrazioni misurate è il periodo di campionamento. Come può essere riscontrato nella Tabella n. 4, i periodi di campionamento variavano fra 12 ore e 2 settimane.

CARATTERIZZAZIONE DEGLI EFFETTI SULLA SALUTE

Questo paragrafo esamina la conoscenza attualmente disponibile circa gli effetti sulla salute dei composti organici presenti nell'atmosfera indoor. Tali effetti coprono un'ampia gamma di risposte, che vanno dagli effetti sensoriali indesiderati come cattivi odori e irritazioni sensoriali, a effetti tossici che modificano la normale funzionalità di organi, interferiscono con essa o determinano danni tissutali, fino a effetti genotossici. Si tratta inoltre di effetti che hanno una sequenza temporale differente, che può andare da una percezione acuta di cattivi odori con susseguente adattamento, a un'azione irritativa che diventa via via più grave con il prolungarsi dell'esposizione, fino a raggiungere l'espressione ritardata di effetti genotossici per il persistere dell'esposizione. Analogamente gli effetti sensoriali hanno una soglia di concentrazione sotto la quale non si ha alcuna risposta, e questo pare anche verificarsi



per la maggior parte degli effetti tossici che colpiscono tessuti e organi, ma è generalmente accettato il fatto che agenti genotossici non abbiano alcuna soglia. Di conseguenza, gli effetti noti sulla salute di inquinanti aeriformi organici indoor saranno presentati in forma tabulare.

Un gran numero di composti organici è stato valutato in relazione alla salute, con differenti obiettivi e in differenti contesti sperimentali. Tali valutazioni compaiono nel volume Air Quality Guidelines for Europe (AQG), pubblicato nella serie dell'O.M.S. Environmental Health Criteria, in valutazioni effettuate da nazioni diverse, in studi occupazionali che hanno condotto alle concentrazioni massime accettabili come i valori limite di soglia (TLV - Threshold of Limit Values, emanati dalla American Conference of Governmental Industrial Hygienists), e alla concentrazioni massime ammissibili sul lavoro (MAK: Maximale Arbeitsplatz-Konzentrationen, emanate dalla MAK Commission, Repubblica Federale di Germania), in studi di esposizione, valutazioni di rischio e così via. Le informazioni ottenute sono state assemblate in modo da porre in relazione, per ogni composto, gli effetti documentati alle esposizioni indoor. L'obiettivo era quello di determinare gli effetti sulla salute e la necessità di ulteriori studi. Sono stati considerati vari punti di vista, che riguardano sia gli effetti sulla salute sia il monitoraggio delle esposizioni, allo scopo di determinare le relazioni esposizione-risposta che sono state riportate.

Gli effetti di questi composti sono stati classificati ripartendoli in 3 categorie principali:

- a) cattivi odori e altri effetti sensoriali come l'irritazione;
- b) irritazioni delle mucose e altre morbidità dovuta a tossicità sistemica;
- c) genotossicità e cancerogenicità

Esistono alcune sostanze chimiche che si pensa abbiano effetti importanti, ma per le quali non abbiamo una conoscenza adeguata dell'esposizione a cui è soggetta la popolazione. Infine esiste una serie di composti, che sono stati misurati, per i quali non siamo ancora in grado di



indicare l'impatto sulla salute pubblica.

I livelli indoor sono tali che la formaldeide desta preoccupazione in oltre il 10% degli ambienti confinati che sono stati sottoposti a indagine.

Sono stati condotti solo pochi studi di esposizione per i composti organici presenti nel fumo di tabacco ambientale (fumo passivo), comprendenti nitrosamine, amine aromatiche, acroleina e aldeidi; si tratta di sostanze importanti che necessitano di ulteriori valutazioni (vedi oltre). Sono stati poi condotti solo studi limitati sugli idrocarburi aromatici polinucleari (PAH) e specificamente per il benzo(a)pirene; essi derivano da diverse sorgenti di combustione, sia in ambiente interno sia esterno (con un rapporto interno/esterno talora prossimo a 1,0). Anche per questi composti è necessaria un'ulteriore valutazione (vedi oltre). Per altri composti genotossici probabilmente importanti occorre determinare l'entità delle sorgenti, come pure valutare l'esposizione; fra questi vanno compresi altri alcheni non clorurati (come l'etilene e l'1,3-butadiene), le resine epossidiche e i costituenti delle resine poliuretatiche (ad esempio i diisocianati). La Tabella n. 5 presenta le diverse sostanze chimiche con gli effetti noti sulla salute ad esse associati.

a) Effetti sensoriali

Molte sostanze chimiche possiedono caratteristiche, sia odorose sia irritanti, che di solito non possono essere facilmente differenziate dalla percezione umana; i metodi sperimentali oggi in uso per presentare i diversi odori agli esseri umani non riescono a determinare la potenzialità odorosa e quella irritativa di un composto chimico in modo separato.

Caratteristiche importanti di un agente odoroso irritante



sono le concentrazioni alle quali può essere rilevato (soglia di percezione) e riconosciuto (soglia di riconoscimento).

Negli studi condotti da laboratori diversi che usano tecniche di misure differenti, le soglie di rilevamento e quelle di riconoscimento possono variare in un range che copre fino a 5 ordini di grandezza. Questo è dovuto a variazioni nel protocollo di ricerca, che riguardano ad esempio: il tipo di dosaggio dei prodotti chimici (statico, dinamico, velocità di flusso ecc.); i metodi di presentazione del prodotto al soggetto (cappa, camera, imbuto); le modalità di risposta (scelta obbligata, numero delle alternative a confronto); la gamma di concentrazione e il numero di concentrazioni; il metodo psicofisico di misura (metodo dei limiti oppure metodo degli stimoli costanti).

La valutazione degli aspetti qualitativi degli effetti sensoriali (per esempio la tipologia dell'odore) può essere condotta in modo conveniente solo per quanto riguarda gli esseri umani. Odori e irritazione sensoriale sono percezioni e di conseguenza risultano per definizione di natura soggettiva. Nel corso di una esposizione prolungata il sistema olfattivo si adatta, di conseguenza le misure olfattive dovrebbero tenere in considerazione questo fenomeno. Nella irritazione sensoriale l'adattamento è meno pronunciato ed è talora assente.

Si può impiegare un certo numero di indicatori, o di misure sostitutive, per stimare o prevedere la potenzialità odorosa o di irritazione sensoriale delle sostanze chimiche. E' stato suggerito il concetto della VOC totale come indicatore della qualità dell'aria in ambienti confinati. Sovente viene utilizzata l'anidride carbonica come indicatore della qualità dell'aria indoor, in particolare per i bioeffluenti. La correlazione di uno qualsiasi di questi indicatori VOC con la qualità dell'aria indoor e/o con la potenzialità odorosa o irritativa non è stata ancora dimostrata in modo soddisfacente. Come è già stato riferito, esistono 2 classi di effetti sensoriali che vanno considerate, e cioè l'odore e l'irritazione sensoriale. Tutta l'informazione sensoriale viene in qualche modo integrata per



formare un segnale globale, ma ancora oggi non è noto come questo fenomeno si verifichi. Fondamentalmente si ritiene perciò che l'odore e i diversi tipi di irritazione siano sensazioni indipendenti. Tuttavia l'odore e l'irritazione nasale/trigemiale in qualche misura si mescolano e non sono pertanto davvero reciprocamente indipendenti.

Il termine percezione descrive la sensazione emanata da segnali nervosi, mentre quello riconoscimento descrive il risultato di una rielaborazione ulteriore, abitualmente di segnali più forti, che conduce a una identificazione positiva dello stimolo.

Molti diversi sistemi sensoriali che rispondono ad agenti irritanti sono situati sulla superficie corporea, o prossimi ad essa. Possono essere identificati 5 tipi principali, e cioè i sistemi riferibili all'occhio, al naso, alla gola, alla pelle del viso e al rimanente apparato cutaneo del corpo. Alcuni di questi sistemi tendono a rispondere a una dose accumulata e la loro reazione non è così immediata e acuta come nel caso della percezione di un odore. I soggetti che rispondono sono spesso incapaci di identificare un unico sistema sensoriale come sorgente primaria e di risposta a particolari composti chimici aeriformi; tuttavia sembra che nel caso più frequente si verifichi irritazione oculare e nasale. La sensazione di irritazione viene poi influenzata da un certo numero di altri fattori, come la pressione sulla pelle di una maschera di esposizione, oppure esposizioni precedenti o ancora la temperatura della pelle e l'umidità o la dieta e i farmaci assunti.

I dati disponibili riguardo alla potenzialità odorosa e irritativa possono essere usati in differenti modi:

- a) l'effetto di un prodotto chimico o di una miscela di composti può essere descritto quantitativamente;
- b) i dati possono essere usati come segnali (indicatori) per il controllo delle fonti;

oppure

- c) i dati possono fornire segnali d'allarme utili a

proteggere contro effetti ritardati.

Percezione

Le curve dose-risposta possono essere utilizzate per indicare una soglia di percezione o irritazione di sistemi sensoriali specifici. Per le soglie di percezione possono essere adoperate le ED50 e anche le ED10 e ED90 (cioè le dosi che provocano una risposta, rispettivamente, nel 50%, 10% e 90% della popolazione esposta). La variazione nella durata dello stimolo dovrebbe essere presa in considerazione.

La sensibilità individuale al medesimo stimolo sensoriale può variare di un fattore 1.000. La distribuzione delle sensibilità sembra essere asimmetrica.

Informazione dose-effetto

L'informazione dose-effetto è di due tipi: uno di questi indica la relazione psicofisica così come viene espressa dalla pendenza della funzione che mette in relazione l'intensità percepita con la concentrazione. Sono disponibili veramente poche informazioni circa le relazioni dose-effetto degli agenti irritanti, qualcosa di più è noto circa gli odori. La persistenza di un odore o di un agente irritante può essere valutata mediante la pendenza della Stevens Psychophysical Power Function (funzione dose-risposta), che mette in correlazione l'intensità percepita della sensazione con la concentrazione.

Il secondo tipo di informazione dose-effetto riguarda l'elaborazione di aspetti qualitativi. La qualità percepita dell'irritazione sensoriale viene descritta, riferendosi ai sistemi sensoriali e alle aree cutanee interessate, in termini di bruciore, dolore acuto, prurito, solletico, dolore e così via. La qualità dell'odore può essere indicata da una soglia



di riconoscimento, ED50, e preferibilmente anche da una ED10 e ED90. Le soglie di riconoscimento non vengono raccomandate come misure uniche per valutare l'importanza di un particolare agente chimico ai fini della qualità dell'aria indoor. Tuttavia in molti casi sono le sole misure disponibili.

Impatto

L'impatto delle irritazioni sensoriali viene misurato come la manifestazione e l'entità di sintomi e senso di malessere soggettivi. Una misura di questo tipo potrebbe essere l'intensità del malessere, ordinata in modo gerarchico su una scala ordinale.

L'impatto di un odore può essere valutato ordinando in modo gerarchico effetti come l'accettabilità di un odore percepito, il senso di fastidio che provoca, ecc. Occorre tuttavia notare che, per quanto riguarda le sostanze non odorose come il monossido di carbonio e l'ozono, le misure basate sugli effetti sensoriali non risultano adeguate come guida per la protezione della salute umana.

b) Effetti derivati

Gli effetti derivati delle irritazioni sono numerosi. Essi possono includere sintomi soggettivi e segni oggettivi di congiuntiviti (sensazioni di bruciore, occhi rossi, modificazione dei costituenti cellulari del liquido lacrimale e aumento della lacrimazione), starnuti, tosse, raucedine, senso di secchezza delle membrane mucose, eritema cutaneo o edema e modificazione della funzione respiratoria. Tali modificazioni possono verificarsi a livello di funzionalità delle vie aeree e di resistenza nasale. Occorre riportare ciascuno di questi effetti derivati dell'irritazione e descrivere pienamente la curva dose-effetto in maniera da poter



determinare la ED50.

La sensazione odorosa può condurre ad un certo numero di effetti secondari o derivati. Esempi di tali effetti possono essere il vomito, comportamenti di fuga, interazioni con altri sistemi sensoriali o biologici, l'innescò di reazioni di ipersensibilità e modificazioni delle modalità respiratorie. Una descrizione degli effetti derivati di un agente odorante deve includere una lista dei sintomi fisici riferiti della loro intensità e preferibilmente la ED50 relativa alla relazione dose-effetto. E' probabile che sintomi di irritazione sensoriale e l'innescò di reazioni di ipersensibilità siano i più importanti effetti derivati di odori per quanto riguarda la qualità dell'aria indoor.

Variazioni nel tempo

Gli odori dovrebbero essere misurati sulla base della risposta immediata di un sistema olfattorio non assoggettato ad adattamento (cioè appena il soggetto è entrato nella stanza). Un'esposizione continua e prolungata normalmente porterà a fenomeni di adattamento olfattivo, cioè a una diminuzione della forza dell'odore che viene percepito, cosa che nel tempo determina un aumento della soglia di percezione dell'odore. Non è chiaro se anche la soglia di riconoscimento per gli odori si modifichi in modo analogo, in funzione del tempo di esposizione. Nel tempo gli effetti secondari possono aumentare, se questi sono dose-dipendenti (accumulo della dose). L'adattamento olfattivo a uno stato quasi stazionario richiede circa 2-20 minuti. Normalmente questo adattamento causa una diminuzione dell'intensità dell'odore percepito circa del 50% e oltre; la velocità e durata del processo variano con la concentrazione e anche con il tipo di sostanza chimica.

Le prove sperimentali suggeriscono che l'adattamento olfattivo è reversibile, e che il tempo di recupero dopo la fine dello stimolo



è inferiore a 5 minuti. Nei casi in cui è stato studiato, il tempo di recupero è risultato più veloce del processo di adattamento. L'adattamento sensoriale a miscele tende a risultare specifico per quel certo odore della miscela, e a mostrare pochi segni di adattamento incrociato ad altri odori. Come conseguenza dell'adattamento a qualsiasi odore nell'aria di ambienti confinati, possono essere identificati due tipi di risposte differenti: la risposta tipica del visitatore e quella dell'occupante.

Quanto è stato riferito indica che la conoscenza attuale circa gli effetti sensoriali dei contaminanti organici indoor non può spiegare pienamente il ruolo sostanziale che gli effetti sensoriali rivestono nel determinare l'accettabilità della qualità dell'aria in ambienti confinati. Risulta anche chiaro, da quanto abbiamo riportato, che le concentrazioni di inquinanti organici realmente ritrovati in quantità sensibili in ambienti confinati sono molto più vicine alle concentrazioni alle quali si verificano effetti sensoriali, che non a quelle per le quali sono stati riferiti effetti tossici sistemici.



Tabella n. 5 - Inquinanti organici dell'aria per i quali sono stati dimostrati effetti sulla salute.

Inquinante	Livello dell'effetto		Rischio unitario ^(a)	TLV (mg/m ³)	MAK (mg/m ³)	Note
	Tipo	mg/m ³				
<i>Idrocarburi alifatici</i> n-esano				180	180	Soglia di percezione dell'odore 230 mg/m ³
esano (isomeri) n-eptano ottano nonano				1800 1600 1450 1050		
<i>Cicloalcani</i> cicloesano metilcicloesano				1050 1600	1050	
<i>Idrocarburi aromatici</i> benzene			4	30	16 (TRK) ^b	Può causare: leucemia, anemia aplastica, policitemia (midollo osseo) (TLV per gli ultimi 2)
toluene	NOEL ^(c)	187		380		Valore di AQG 7,5 mg/m ³ (24h); limite sensoriale 70 mg/m ³ ; soglia di percezione dell'odore 1 mg/m ³ , neurotossico; insufficienti i dati sulla cancerogenità (animali); mutagenicità negativa
m,p-xilene				435	440	Soglia di percezione dell'odore 0,6 mg/m ³
o-xilene etilbenzene trimetilbenzene isopropilbenzene stirene	LOEL ^(d)	210		435 125 215	440 245 85	Soglia di percezione dell'odore 0,07 mg/m ³ (valore sensoriale AQG, 30 min); valore AQG 0,8 mg/m ³ (24h); neurotossico; irritante delle mucose: prove



						limitate di carcinogenesi (IARC)
<i>Idrocarburi clorurati</i> cloroformio				50	50	Sospetto cancerogeno, prove animali sufficienti (ACGIH)
clorometano				30	65	Sospetto cancerogeno per la pelle (ACGIH)
tricloroetilene	NOAEL ^(e)	189		270	270	Sospetto cancerogeno, IARC gruppo 3; neurotossico; epato e nefrotossico; genotossico; teratogeno; valore AQG 1mg/m ³ (24h); limite occupazionale AQG 135 mg/m ³
1,2 dicloroetano				40	80	Cancerogeno nell'animale (per via orale) mutageno; valore AQG 0,7 mg/m ³ (24h)
diclorometano	NOAEL	173		350	360	Formazione di COHb; valore AQG 3 mg/m ³ (24h); neurotossico; soglia di percezione dell'odore 3 mg/m ³ ; bassa attività mutagena; sufficienti prove di cancerogenicità negli animali
vinilcloruro				10	508 ^(f)	IARC gruppo 1 (fegato e altre forme di cancro)
tetracloroetilene	NOEL	136		335	345	Valore AQG 5 mg/m ³ ; effetti sul SNC a 136 mg/m ³ ; soglia di percezione dell'odore 8 mc/m ³ (30 min); cancerogeno negli animali, IARC gruppo 3



<i>Idrocarburi clorurati</i>						
bromoformio				5		
clorobenzene				350	230	
o-diclorobenzene				300	300	
p-diclorobenzene				450	450	
1,2,4-triclorobenzene				40	40	
1,1,1-tricloroetano				1900	1080	
<i>Alcoli</i>						
etanolo				1900	1900	
<i>Esteri e chetoni</i>						
etil acetato				1400	1400	
butil acetato (isomeri)				710	135	Soglia di percezione dell'odore 0,03 mg/m ³
butanone				590	590	Soglia di percezione dell'odore 5,8 mg/m ³
<i>Aldeidi</i>						
formaldeide				1,0	0,6	Valore AQG a breve termine 0,1 mg/m ³ (30 min)
acetaldeide				180	90	Irritazione, odore
acroleina				0,25		Irritazione oculare
butanal					300	Soglia di percezione dell'odore 158 mg/m ³
<i>Altri composti</i>						
naftalene				50	50	Soglia di percezione dell'odore 0,3 mg/m ³ ; tossicità animale a 2.500 mg/m ³
PAH miscele			9x10 ⁴			Cancerogeno nel polmone (AQG), IARC gruppo 1
benzo(a)pirene						Sospetto cancerogeno, prove sufficienti negli animali
sodio dodecilsolfato						Irritazione in individui sensibili (shampoo per tappeti)

(a) Rischio aggiuntivo di cancro, nell'arco della vita, derivante dalla esposizione a 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, per milione di persone.

(b) Non sono stati stabiliti valori MAK per le sostanze confermate come agenti cancerogeni nell'uomo. Per alcune di queste, sono state stabilite le concentrazioni-guida tecniche (TRK in tedesco), formulate sulla base di considerazioni tecniche e socioeconomiche.

(c) NOEL=*no-observed-effect level* (livello al quale non sono stati osservati effetti).

(d) LOEL=*lowest-observed-effect level* (livello minimo al quale non sono riscontrabili effetti).



CENTRO DI FISICA AMBIENTALE

WWW.CFAMBIENTE.COM

- ^(e) NOAEL=*no-observed-adverse-effect level* (livello al quale non vengono osservati effetti sfavorevoli)
- ^(f) 8 (TRK per la produzione di vinil cloruro)
5 (TRK per tutti gli altri casi)



c) Genotossicità e cancerogenicità

Genotossicità e cancerogenicità sono effetti che si esprimono a lungo termine dopo l'esposizione ad una sostanza tossica, tanto che risulta più difficile stabilire un rapporto di causa-effetto. Un protocollo di protezione contro questo tipo di esposizioni viene ottenuto da una serie di passi diversi: identificazione del rischio, ricerca e stima della sua dimensione e attività tesa a ridurlo. Si ritiene che, a differenza di molti altri effetti tossici, gli effetti genotossici e cancerogeni in genere non presentino una concentrazione di soglia; la stima del rischio viene quindi condotta a concentrazioni molto basse.

Esistono tre diversi approcci per l'identificazione del rischio: studi epidemiologici di popolazioni umane, studi tossicologici che usano modelli animali e test di laboratorio in vitro. Questi ultimi indicano la potenza mutagena, i test sull'animale determinano la potenzialità cancerogena nell'animale, e gli studi epidemiologici sull'uomo determinano la forza della relazione fra esposizione e cancro umano. La maggior parte delle valutazioni circa la potenzialità cancerogena si basano su test condotti sugli animali. Esiste una varietà di modelli matematici utilizzati per stimare il rischio di cancerogenesi nell'uomo, sulla base di test sugli animali.

All'interno di questi modelli occorre accogliere molte ipotesi di lavoro, per poter formulare estrapolazioni a partire dai dati ottenuti dagli animali. I modelli differiscono ampiamente in termine di ordine di grandezza, a seconda delle ipotesi sulle quali si basano. I fattori di incertezza aumentano man mano che il ricercatore si allontana dai dati sull'uomo.

Sono riconosciuti i seguenti gruppi:

Gruppo 1. L'agente è cancerogeno per l'uomo (esistono prove sufficienti di cancerogenicità negli uomini);



Gruppo 2A. L'agente è probabilmente cancerogeno per l'uomo (esistono prove limitate di cancerogenicità nell'uomo e prove sufficienti negli animali da esperimento);

Gruppo 2B. L'agente potrebbe essere cancerogeno per l'uomo (prove inadeguate di cancerogenicità nell'uomo ma prove sufficienti negli animali, oppure prove limitate nell'uomo senza prove sufficienti negli animali);

Gruppo 3. L'agente non può essere classificato nei confronti della sua cancerogenicità per l'uomo;

Gruppo 4. L'agente è probabilmente non cancerogeno per l'uomo (le prove suggeriscono l'assenza di cancerogenicità negli animali).

Diversi Paesi usano queste classificazioni per identificare i cancerogeni per l'uomo al fine di stabilire normative, e ognuno di essi può interpretare il loro significato in modo diverso, a seconda della normativa nella quale sono incluse. Dei composti che si ritrovano nell'aria indoor con una certa frequenza e consistenza, 5 sono stati identificati come possessori di proprietà genotossiche e/o cancerogene. L'informazione su questi composti viene fornita nella Tabella n. 6. La prima colonna indica la classificazione e la seconda rappresenta il rischio unitario, che esprime l'aumento di rischio di sviluppare un cancro nell'arco della vita, per un incremento di esposizione pari a 1 microgrammo per metro cubo.

Per consentire una corretta prospettiva di interpretazione viene fornita la base sulla quale è stato calcolato il rischio unitario, a seconda che sia derivato da dati sull'uomo o da dati su animali da esperimento.

Tabella n. 6 - Parametri di cancerogenicità di inquinanti aerei indoor

Sostanza	Classificazione IARC	Rischio unitario*	Base per la valutazione del rischio di cancro
Benzene	1	4.0	Studi epidemiologici sull'uomo



Tetraclorometano	2B	15.0	Estrapolazione da dati sull'animale
Cloroformio	2B	10.0	Estrapolazione da dati sull'animale
1,2-dicloroetano	2B	26.0	Estrapolazione da dati sull'animale
Tricloroetilene	2B	3.1	Estrapolazione da dati sull'animale

* Rischio aggiuntivo di cancro derivante dalla esposizione a 1 µg/m³ per milione di individui esposti

E' importante rendersi conto che occorre dedicare una seria attenzione ad alcuni inquinanti indoor che non sono sostanze singole, ma prodotte in forma di miscele complesse e difficili da caratterizzare mediante le strategie di monitoraggio utilizzate finora. Due sorgenti di miscele complesse di inquinanti sono il fumo di tabacco ambientale e la fuliggine da combustione incompleta. La caratterizzazione chimica di queste miscele è ancora imperfetta, ma le misure effettuate sui loro diversi effetti negativi per la salute suggeriscono che esse possiedono un grave potenziale cancerogeno. La Tabella n. 7 riassume gli effetti genotossici e cancerogeni già documentati per tali miscele.

Tabella n. 7 - Schema della genotossicità e cancerogenicità di miscele indoor

Miscela	Compon. importanti	Classificaz IARC	Rischio unitario*	Base per la valutazione e del rischio	Genotossicità		Cancerogenicità	
					sperimentale	nell'uomo	nell'animale	nell'uomo
Fuliggine		1	20	Uomo	+	+	+	+
	PAH	2B	600	Uomo	+	+	+	NA ^b
Fumo passivo			2	Uomo	+	?	+	+
	Nitrosamide	?	?	?	+	NA	+	+
	Amine aromatiche	?	?	?	+	NA	+	+
	Aldeidi	?	?		?	NA	+	?
	Nicotina	NA	?		-	NA	-	NA
	Particolato							



	respirabile	NA	?		+	NA	+	NA
--	-------------	----	---	--	---	----	---	----

* Rischio addizionale di cancro derivante dalla esposizione a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per milione di individui esposti.

^(b) NA=Dati non disponibili.

Gli effetti genotossici sono divisi in effetti di tipo sperimentale e in effetti sull'uomo. Gli effetti genotossici sperimentali vengono misurati con test per la mutagenicità e per gli effetti genotossici, quali l'induzione: della duplicazione del DNA, di inclusione di frammenti e di danno cromosomico, in organismi che vanno dai batteriofagi ai mammiferi. Tutti questi test esplorano la capacità caratteristica di molti agenti cancerogeni nel determinare sia direttamente sia indirettamente danni al DNA o anomalie cromosomiche. Ai fini della valutazione del rischio, si suppone abitualmente che questi agenti cancerogeni non abbiano alcun livello di soglia.

Gli effetti genotossici possono anche essere valutati direttamente, indagando l'effetto sugli animali o sulla loro prole. Si può riscontrare, ad esempio, i seguenti effetti: anomalie cromosomiche nelle cellule del midollo osseo e nei linfociti ematici di roditori; mutazioni loco-specifiche nei roditori e nelle loro prole trattata con l'agente testato. Questi risultati vengono combinati con i test sperimentali in vitro per esprimere un risultato aggregato (+, -, ?), come è espresso nella Tabella n. 7. Finora è stato difficile decidere come utilizzare i risultati in vitro quando differiscono da risultati tossicologici sull'animale (ad esempio se sono rispettivamente positivo e negativo).

Studi analoghi possono essere condotti su linee cellulari asportate da uomini esposti a miscele o a sostanze chimiche singole. Prove dell'assorbimento di agenti genotossici possono essere ottenute dalla ricerca di attività dannosa per il DNA nei liquidi corporei e negli escreti, con l'utilizzo di test di mutazione batterica. Questi mostrano una grande variabilità ma rivelano significative differenze ad esempio nei fumatori accaniti. Nella Tabella n. 7, colonna delle genotossicità umana, è



fornito un riassunto dei risultati ottenuti.

ALTRI RISCHI POTENZIALI

Pesticidi

I pesticidi (compresi insetticidi, rodenticidi, termiticidi e germicidi) sono per definizione dei veleni e occorre enfatizzare la necessità di mettere in guardia il pubblico circa il loro uso. In generale sono disponibili solo dati limitati circa le frequenze di emissione di pesticidi nell'ambiente indoor, poiché l'interesse a misurarli in questo ambiente è emerso solo in epoca recente. Le informazioni disponibili circa gli effetti dei pesticidi sulla salute riguardano gli effetti acuti e cronici e comprendono anche la cancerogenicità. Generalmente si basano su studi sugli animali e coprono gli effetti derivanti dalle vie di esposizione orale o dermica. Informazioni limitate disponibili circa le esposizioni per inalazione hanno prevalentemente la forma di studi di tossicità acuta, con un'esposizione reale ai pesticidi che dura circa 4 ore. L'informazione circa l'esposizione dell'uomo ai pesticidi in ambienti confinati è frammentaria, così come lo sono i dati circa studi sull'inalazione a lungo termine da parte di animali. Le concentrazioni indoor di pesticidi comuni sono state riscontrate negli Stati Uniti nell'ambito dei seguenti valori:

clordano (0,1-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

fenclofos (0,2-2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

clorpyrifos (0,2-2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

malathion (0,2-2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

dimpylate (0,2-2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Il clordano è un composto organico clorurato, mentre gli altri pesticidi elencati sono organofosfati. Gli effetti tossici generali degli organofosfati comprendono dispnea, salivazione, lacrimazione,



sudorazione, nausea, vomito, bradicardia, contrazione pupillare, senso di fatica, tensione, ansietà, irrequietezza, cefalea, apatia, confusione e tremore. Il clordano produce visione confusa, confusione, atassia, tosse, dolore addominale, nausea, vomito, cefalea, vertigini e spasmi cronici di lieve entità. Di recente il clordano è anche stato identificato come un probabile cancerogeno per l'uomo e il suo uso è stato bandito negli Stati Uniti.

Nitrosamine

Le nitrosamine sono state misurate in ambienti confinati a concentrazioni dell'ordine di $0,03 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$. E' noto che vengono prodotte dal fumo di tabacco. Altre possibili sorgenti indoor di nitrosamine comprendono sistemi di cottura, stufe che funzionano a legna e caminetti. Alcune nitrosamine, come sostanze singole, sono state dimostrate cancerogene sia nell'uomo sia negli animali. A causa della prevalenza delle sorgenti di nitrosamine negli ambienti indoor è necessario esaminarle in maggior dettaglio, soprattutto per quanto riguarda: le caratteristiche del singolo inquinante, le loro sorgenti, la forza e frequenza di emissione, le frequenze con le quali si verificano effetti sulla salute e la tipologia degli effetti attesi.

Cloruro di vinile

A metà degli anni '70 si è scoperto che la produzione di polivinilcloruro era associata ad una rara forma di cancro epatico. Da allora in poi è stata devoluta molta attenzione al potenziale cancerogeno del cloruro di vinile come classe chimica. A causa del suo uso diffuso nell'industria plastica, si è pensato che il vinilcloruro potesse liberarsi allo



stato gassoso nell'ambiente indoor. E' stato tuttavia raramente misurato in ambienti confinati, ma dovrebbe in ogni caso essere classificato come composto di alto interesse a causa del suo potenziale cancerogeno e anche per le sue elevate proprietà tossiche, che si sono manifestate nei luoghi di lavoro.

Idrocarburi aromatici polinucleari (PAH)

Molti PAH, compreso il cancerogeno benzo(a)pirene, vengono rilasciati nelle abitazioni da stufe a carosene del tipo senza camino, da stufe a legna, da caminetti con tiraggio difettoso e dal fumo di sigaretta. A causa del gran numero di specie chimiche componenti la famiglia dei PAH, è difficile prevedere i loro effetti e collegarli a specifici inquinanti. La loro composizione chimica e la loro concentrazione variano con le condizioni di combustione, inoltre la natura delle interazioni con i singoli composti PAH varia a seconda dei sistemi di detossificazione nel corpo umano. Alcuni PAH sono cancerogeni o co-cancerogeni e tendono a dipendere, nel loro potenziale di arrecare danni, dalla forma di attivazione enzimatica che si verifica nei polmoni o negli epatociti. Poiché molti componenti di una mistura complessa di PAH agiscono insieme su queste altrettanto complesse vie metaboliche enzimatiche, l'esito finale dell'attività metabolica è molto difficile da predire. Ciò non di meno il danno alle macromolecole, come il DNA o le proteine, è una conseguenza che può produrre le modificazioni genetiche e le modulazioni che esitano in cancro. Nonostante le concentrazioni relativamente basse di PAH che si riscontrano in ambienti confinati, quando si comparino con le concentrazioni generalmente molto più elevate che si incontrano in esterni e nei luoghi di lavoro, il potenziale cancerogeno dei PAH da soli richiede ulteriori ricerche sulle loro specificità rischi per la salute, identificazione e valutazione dell'esposizione dell'uomo per quanto



riguarda gli ambienti confinati.

Composti organici aeriformi derivanti da materiali da costruzione, arredi e prodotti d'uso

L'ambiente indoor è costituito da molte sorgenti di composti organici aeriformi. Di particolare attenzione necessitano i nuovi materiali da costruzione, gli arredi come i tappeti sintetici, i prodotti per la pulizia e i prodotti particolari come quelli usati per gli hobby, per la grafica o a scopi creativi. Nei nuovi materiali da costruzione sono state riscontrate sorgenti di resine epossidiche, di formaldeide e, fra l'altro, di un certo numero di solventi residuali. I prodotti per la pulizia di tutti i tipi, i coloranti, le pitture, i prodotti per rimuovere le pitture, i diluenti, la trementina, la gomma lacca, le vernici trasparenti e i rivestimenti protettivi contengono molti composti organici. I più comuni sono derivati del petrolio (benzene, toluene, xilene e acetone), il cloruro di metilene e altri composti alogenati; come è già stato detto, in forma gassosa essi provocano effetti rilevanti a carico della salute. Tuttavia, essi possono anche legarsi a particelle sospese nell'ambiente indoor o essere rilasciati sotto forma di aerosol. Come composti organici legati a particelle possono depositarsi nei polmoni e causare effetti negativi sulla salute per questa via di esposizione tipica della deposizione di particelle.

Per quanto riguarda i materiali e molti prodotti d'uso, la liberazione allo stato gassoso di questi solventi diminuisce con il tempo; l'unico composto organico del quale sia nota la liberazione per periodi prolungati è la formaldeide. Si sa però ancora poco circa altre sostanze comuni. E' necessario ottenere i fattori di emissione per una più ampia gamma di composti organici comuni, che riguardano i materiali da costruzione, gli arredi, i prodotti chimici per la casa e i prodotti d'uso. La variabilità nel tempo della emissione di composti che presentano effetti



gravi o moderati sulla salute deve essere valutata in relazione all'esposizione umana. Questa valutazione di esposizione è particolarmente importante quando vengono introdotti nel mercato per la prima volta nuovi prodotti, o quando per la prima volta vengono introdotti in un ambiente confinato.

CONSERVAZIONE E MIGLIORAMENTO DELLA QUALITA' DELL'ARIA IN AMBIENTI CONFINATI

Dai risultati di questo studio si potrebbe trarre la conclusione generale che gli inquinanti aeriformi organici in ambienti confinati sono simili, per distribuzione delle specie chimiche e per distribuzione delle concentrazioni, in ambienti residenziali di diversi paesi industrializzati. Ciò è già stato riferito da alcune ampie indagini. Molto simili sono pure i rapporti indoor/esterni, e indicano la presenza di sorgenti all'interno dell'ambiente residenziale. In una certa misura, i prodotti possono essere modificati per ridurre la forza delle sorgenti, e in qualche modo le sorgenti possono essere ridotte grazie all'uso di prodotti alternativi. Le esposizioni caratteristiche delle abitazioni, d'altro canto, possono essere considerevolmente ridotte se gli occupanti effettuano scelte appropriate. La riduzione dell'esposizione dipenderà quindi dal riconoscimento delle sorgenti e dalla possibilità di fornire un efficace forma di informazione e consiglio alle famiglie. I risultati della ricerca sulla qualità dell'aria indoor, ricerca che tipicamente verrà portata avanti sotto gli auspici di agenzie governative, dovranno essere comunicati a chi prende decisioni in ambito familiare. Una ricerca sistematica sui metodi di formazione e consulenza circa i fattori che possono determinare la qualità dell'aria indoor e i benefici attesi da un suo miglioramento condurrà a programmi generali più efficaci.

Strategie diverse sono invece necessarie per i fabbricati



nei quali gli occupanti non possono controllare direttamente gli ambienti aerei individuali. Il controllo dei meccanismi di feed-back di ambienti residenziali individuali non è efficace, infatti, per quanto riguarda gli edifici pubblici. Una ricerca diretta verso gli effetti della qualità dell'ambiente indoor sul benessere degli occupanti, espressa in produttività e qualità del prodotto sviluppato in queste situazioni, è di grande importanza ai fini del miglioramento della qualità dell'aria indoor. In questo modo si tenderà a far coincidere l'interesse degli occupanti con quello degli amministratori dei fabbricati.

CONCLUSIONI

1. La distribuzione delle concentrazioni in ambienti confinati del monossido di carbonio, del biossido di azoto e dei composti organici volatili è molto meglio conosciuta rispetto a quella di composti organici molto volatili, semivolatili e legati a particelle, e delle sostanze reattive di tutti i gruppi. Sussiste la necessità di raccogliere dati circa la distribuzione di questi ultimi gruppi.

2. I composti organici possono causare odori, irritazioni alle mucose e sensoriali ed effetti sulle vie aeree, ai livelli ai quali sono presenti negli ambienti chiusi. Gli effetti tossici acuti su diversi organi di solito si verificano solo a concentrazioni più elevate di quelle che normalmente si riscontrano in ambienti confinati.

3. La valutazione sull'effetto sulla salute di singole sostanze non sempre può risultare adeguata, poiché gli inquinanti indoor di solito sono presenti in miscele e molte fonti emettono miscele di inquinanti. Tuttavia, allo stato attuale delle conoscenze, per stimare i rischi in molti casi può essere applicato solo un approccio che valuti componente per



componente.

4. L'esposizione a composti organici, in particolare a quelli semivolativi e legati alle particelle che si ritrovano negli ambienti confinati, avviene mediante vie diverse (inalazione, ingestione e assorbimento cutaneo). La valutazione della dose totale e il contributo relativo dell'esposizione dovuta all'aria indoor richiede ulteriori studi.

5. I limiti degli strumenti analitici attualmente utilizzati non coincidono con i limiti di percezione dei sistemi sensoriali umani. Di conseguenza molti agenti caratterizzati da un forte odore non sono ancora stati identificati chimicamente.

6. Un valore di limite della concentrazione indoor che si basi sulla percezione del riconoscimento di un odore o di un irritante sensoriale da parte del 50% della popolazione (ED50) non proteggerà la parte più sensibile della popolazione stessa. Inoltre, tale limite non sarà in grado di proteggere contro gli effetti sistemici o genotossici di sostanze che non presentino attività odorosa o irritante.

7. Esistono metodi adeguati per valutare l'effetto totale degli inquinanti organici indoor in termini di malattie croniche. Tali metodi inglobano tutte le informazioni disponibili sulla distribuzione delle esposizioni, gli effetti sulla salute misurati in altre situazioni, e la frequenza basale della malattia in questione.

8. Le informazioni disponibili circa la potenzialità degli inquinanti aeriformi organici come agenti odorosi o irritanti sensoriali sono tuttora inadeguate.

Tabella n. 8 - Tipologia di ambienti confinati (indoor)

Abitazioni
Uffici e/o servizi pubblici (uffici, banche etc.)
Mezzi di trasporto pubblici e/o privati (auto, treni, aerei, navi)

Tabella n. 9 - Fattori che determinano la qualità dell'aria (indoor)

Ventilazione inadeguata
Pollutanti emessi da sorgenti interne
Contaminanti provenienti da sorgenti esterne
Contaminanti biologici



CENTRO DI FISICA AMBIENTALE

WWW.CFAMBIENTE.COM

BIBLIOGRAFIA

CANONICA G.W., *Inquinamento dell'aria e patologia umana*, Ed. Fernando Folini, 1992.

CAZZOLA P., *Aggiornamento medico*, Ed. Kurtis, febbraio 1993.