

## **EFFETTI SUL DNA – POTENZIALI DI INIZIO E PROMOZIONE DEL TUMORE**

Il danno al DNA è spesso il risultato di danni ossidativi a varie strutture e molecole nelle cellule, piuttosto che la conseguenza diretta di radiazioni o sostanze chimiche. Il danno ossidativo può innescare molti altri danni, ad esempio cambiamenti nelle attività enzimatiche e nelle proprietà della membrana cellulare, rotture del DNA a singolo e doppio filamento. Tramite questo percorso indiretto, le frequenze delle radiazioni dei telefoni cellulari e del Wi-Fi possono portare a cambiamenti metabolici e quindi anche al cancro. Il danno al DNA è stato verificato molte volte; già negli anni '90, c'erano diversi studi che lo dimostravano.

Gli studi di Lai e Singh (1995), ad esempio, hanno attirato l'attenzione mondiale. I ricercatori hanno trovato rotture a singolo e doppio filamento nel DNA delle cellule cerebrali di ratto quando esposte a radiazioni pulsate a 2 mW/cm<sup>2</sup> (1,2 W/kg). Immediatamente dopo l'esposizione, le rotture del filamento non erano significative, ma 4 ore dopo erano aumentate in modo significativo rispetto ai controlli. Dopo l'esposizione a campi continui, l'aumento non era significativo. Nel 1996, le rotture del filamento di DNA sono state confermate, ma in questo studio non è stata osservata alcuna differenza significativa tra le esposizioni a radiazioni pulsate e continue. Nello studio del 1997, i ratti sono stati tenuti nelle stesse condizioni, ma prima e dopo l'esposizione, sono stati inoltre trattati con melatonina o N-terz-butil-alfa-fenilnitrone (PBN), entrambi molto efficaci nell'eliminare i radicali liberi. Di conseguenza, il livello di rotture del filamento di DNA è stato ridotto (valutato tramite analisi in cieco). Questi risultati sono la prova che la radiazione a 2,45 GHz genera stress ossidativo attraverso la formazione di radicali liberi nelle cellule cerebrali dei ratti. Già allora, gli autori Lai e Singh affermarono che le rotture del DNA che si verificano più frequentemente nelle cellule cerebrali possono portare a malattie neurodegenerative e cancro, e i radicali liberi a molte malattie. Questi risultati sono quindi importanti per i problemi di salute correlati alle radiazioni a microonde. Nel 2005, Lai und Singh ha condotto un altro esperimento di 1 mW/cm<sup>2</sup> (0,6 W/kg, 2 ore) e un campo magnetico aggiuntivo di 45 mG (4,5 µT). L'esposizione a radiazioni pulsate e continue ha causato di nuovo livelli significativamente più elevati di rotture a singolo e doppio filamento; il campo da 4,5 µT da solo ha causato quasi nessuna differenza rispetto ai controlli, mentre la combinazione dei due campi ha ridotto il livello di danno al DNA.

Akdag et al. (2016) hanno osservato danni al DNA nel tessuto cerebrale di ratto dopo che animali maschi erano stati esposti a radiazioni Wi-Fi per un anno (SAR corpo intero 41,4 µW/kg e 7127 µW/kg massimo). L'analisi degli organi (cervello, fegato, reni, pelle e testicoli) ha rivelato in tutti i casi danni al DNA negli animali esposti rispetto agli animali di controllo non esposti; tuttavia, le differenze erano significative solo nel tessuto testicolare. Avendaño et al. (2012) hanno potuto dimostrare che le radiazioni Wi-Fi dei laptop riducono la motilità degli spermatozoi e aumentano la frammentazione del DNA negli spermatozoi. Chaturvedi et al. (2011) hanno scoperto nel 2011 che il DNA dei neuroni era significativamente danneggiato nei topi quando venivano esposti (0,026 mW/cm<sup>2</sup>, SAR 0,036 W/kg) per 2 ore al giorno per 30 giorni. Oltre al comportamento, ai valori del sangue (numero di cellule, emoglobina, enzimi), al conteggio degli spermatozoi e alla motilità, gli autori hanno anche analizzato le rotture del filamento di DNA nelle cellule cerebrali dei topi maschi. I

livelli di rotture del filamento erano significativamente più alti nei cervelli esposti rispetto ai controlli.

In tre studi sui cervelli dei ratti, il team di ricerca di Deshmukh (2013, 2015) e Megha (2015) ha studiato il danno al DNA causato da radiazioni ben al di sotto del limite di esposizione ICNIRP di 2 W/kg, tra gli altri. Deshmukh et al. (2013) hanno studiato gli effetti delle radiazioni a microonde di basso livello sui cervelli dei ratti Fischer a 900, 1800 e 2450 MHz per 30 giorni (2 ore/giorno, 5 giorni/settimana, SAR  $5,953 \times 10^{-4}$ ,  $5,835 \times 10^{-4}$  o  $6,672 \times 10^{-4}$  W/kg).

Il danno al DNA è stato verificato tramite il test della cometa. Dopo l'esposizione, tutti i parametri del test della cometa hanno mostrato differenze significative rispetto ai controlli. Il livello di rotture del filamento di DNA è stato il più alto a 2450 MHz. Le radiazioni a microonde possono quindi essere definite un agente genotossico. Quando il DNA viene danneggiato, ciò può portare alla morte cellulare, al cancro o a una malattia neurodegenerativa se il sistema di riparazione viene sopraffatto. Deshmukh et al. (2015) hanno studiato la capacità di apprendimento dei ratti esposti a radiazioni a 900, 1800 e 2450 MHz per 180 giorni; inoltre, le proteine da shock termico (HSP70) e i danni al DNA sono stati determinati a livelli SAR come nello studio descritto sopra ( $5,953 \times 10^{-4}$ ,  $5,835 \times 10^{-4}$  e  $6,672 \times 10^{-4}$  W/kg). Ancora una volta, il test della cometa ha mostrato livelli significativamente aumentati di rotture del DNA rispetto ai controlli, ma anche livelli significativamente aumentati a 1800 e 2450 MHz rispetto a 900 MHz. In entrambi gli studi, Deshmukh et al. hanno riscontrato un aumento dei danni al DNA (rotture dei filamenti) nelle cellule cerebrali dei ratti dopo l'esposizione a livelli molto bassi di radiazioni ( $6,672 \times 10^{-4}$  W/kg) per 30 o 180 giorni, rispettivamente. Come possibile causa, i ricercatori discutono meccanismi indiretti tramite processi ossidativi attraverso specie reattive dell'ossigeno. Nello studio del 2015, gli autori hanno anche osservato livelli aumentati di proteine da shock termico e cambiamenti nel comportamento degli animali (gli animali esposti avevano bisogno di più tempo rispetto agli animali di controllo). Oltre a 2450 MHz, in questo esperimento sono state studiate anche le esposizioni a 900 e 1800 MHz, e si è scoperto che 1800 e 2450 MHz avevano effetti più evidenti. Megha et al. (2015) hanno studiato il cervello di ratti maschi alle frequenze di 900, 1800 e 2450 MHz e ai livelli bassi già menzionati (SAR 0,59, 0,58 e 0,66 mW/kg) dopo 60 giorni di esposizione (2 ore/giorno, 5 giorni/settimana). Oltre ai marcatori di stress ossidativo GSH, SOD, CAT, PCO (proteina carbonile), MDA (malondialdeide) e citochine, è stato analizzato anche il DNA. Dopo l'esposizione, tutti i parametri del test della cometa hanno mostrato un aumento significativo; le differenze più grandi sono state misurate per esposizioni a 2450 MHz.

Oltre allo stress ossidativo e alle risposte infiammatorie, gli esperimenti hanno rivelato danni al DNA nei cervelli dei ratti.

I tre studi dimostrano che tre frequenze causano danni al DNA e che 2450 MHz ha l'effetto maggiore. Gürler et al. (2014) hanno studiato l'effetto dell'estratto di aglio sui ratti.

Hanno cercato di chiarire se l'aglio ha un effetto protettivo quando gli animali sono esposti a radiazioni a microonde a livelli non termici (SAR 0,02 W/kg o 3,68 V/m, 1 ora/giorno per 30 giorni). Il limite di esposizione per il pubblico è fissato a 0,08 W/kg. Un gruppo ha ricevuto un estratto di aglio orale ogni giorno un'ora prima

dell'esposizione. Dopo 30 giorni, la perossidazione lipidica (MDA), l'ossidazione proteica e l'ossidazione del DNA (formazione di 8-idrossi-deossiguanosina, 8-OHdG) sono state determinate nel sangue intero. Nel gruppo esposto, i livelli di concentrazione di 8-OHdG sono aumentati significativamente nel tessuto cerebrale e nel plasma sanguigno rispetto al gruppo di controllo. L'estratto di aglio ha impedito l'aumento dell'ossidazione del DNA (di 8-OHdG). L'ossidazione proteica (livello di prodotti proteici di ossidazione avanzata, AOPP) nel sangue è stata significativamente più alta rispetto ai controlli; a causa dell'estratto di aglio, i livelli del gruppo esposto erano simili a quelli del gruppo di controllo. I livelli di tessuto cerebrale e perossidazione lipidica erano indistinguibili tra i tre gruppi. Conclusione: un'esposizione di basso livello alle radiazioni a 2,45 GHz può causare danni ossidativi significativi nel DNA e nelle proteine del tessuto cerebrale e nel sangue dei ratti; alcune sostanze nell'estratto di aglio possono ridurre significativamente l'effetto ossidativo. Il basso valore SAR di 0,02 W/kg potrebbe essere la ragione per cui non è stato riscontrato un aumento della perossidazione lipidica.

Kesari/Behari e collaboratori (2010a, 2010b, 2012) hanno anche studiato i cervelli dei ratti dopo che gli animali maschi erano stati esposti a radiazioni da 2,45 GHz (2 ore/giorno per 35 giorni, 0,34 mW/cm<sup>2</sup>, SAR corpo intero 0,11 W/kg). Nei cervelli dei ratti esposti, il test della cometa ha rivelato rotture del doppio filamento significativamente aumentate (analisi in doppio cieco), ovvero danni significativi al DNA.

Inoltre, i livelli di attività degli enzimi SOD, glutatione perossidasi e istone chinasi erano ridotti e il livello di catalasi era aumentato. I ricercatori sottolineano che i cambiamenti significativi, il danno al DNA e lo stress ossidativo possono portare alla promozione del tumore. L'equilibrio tra danno e capacità di riparazione è disturbato, il che può portare a mutazioni o apoptosi. Già nel 1993, Maes e i suoi collaboratori osservarono un aumento triplo delle aberrazioni cromosomiche e dei micronuclei nei linfociti dei volontari dopo che i loro campioni di sangue erano stati esposti a radiazioni a 2,45 GHz (impulso a 50 Hz, 80 mW/ml, 75 W/kg) per 120 minuti. L'aumento fu minore dopo 30 minuti. Lo scambio di cromatidi fratelli non si verificò più spesso nei campioni esposti. Gli autori notarono che questa scoperta era sorprendente perché il livello di esposizione era troppo basso (secondo i sostenitori del dogma termico ancora prevalente oggi) per poter rompere direttamente i legami chimici. Paulraj e Behari (2006b) esaminarono i cervelli di ratti maschi di 35 giorni per danni al DNA. I ratti sono stati esposti a 0,344 mW/cm<sup>2</sup> (1 W/kg) per 2 ore al giorno, 5 giorni alla settimana per 35 giorni. Nel gruppo esposto, sono state riscontrate rotture a singolo filamento significativamente aumentate (controlli 24,11 ± 4,47 µm o 41,011 ± 4,66 µm di migrazione del DNA). Negli esperimenti simultanei a 16,5 GHz, sono stati osservati effetti simili. In questo studio, il danno al DNA è stato anche visto come un possibile rischio per disturbi, compromissioni delle funzioni neurologiche e sviluppo di malattie degenerative. Nel 1994 Sarkar et al. hanno riscontrato livelli significativamente aumentati di rotture del DNA nei cervelli e nei testicoli dei topi quando esposti a radiazioni a 2,45 GHz (2 ore/giorno, 1 mW/cm<sup>2</sup>, onda continua, SAR 1,18 W/kg) rispetto ai controlli, per cui i livelli di esposizione erano al di sotto dei limiti ICNIRP. I ricercatori sottolineano che non si tratta di un effetto termico e che questo effetto mutageno aumenta significativamente il rischio di promozione del cancro nel

cervello e nel materiale genetico. Già allora avevano suggerito che i limiti di esposizione avrebbero dovuto essere rivisti. Zotti-Martelli et al. (2000) hanno esposto i linfociti umani di due 27enni sani a tre diversi dispositivi per frequenza (2,45, perché questa è la frequenza di risonanza dell'acqua, e 7,7 GHz, per 15, 30 e 60 minuti, a 10, 20 e 30 mW/cm<sup>2</sup>, analisi in cieco di prove duplicate) e, sulla base di test sui micronuclei, hanno scoperto che la frequenza dei micronuclei nei linfociti esposti aumentava con l'aumento della durata dell'esposizione e dell'intensità del campo; l'effetto era significativo a intensità di campo più elevate e per durate di esposizione più lunghe. I livelli a 2,45 GHz erano i seguenti per i soggetti in entrambi gli studi: controlli 2,5 ‰ a 30 mW/cm<sup>2</sup> e 7,5‰, 8,5‰ e 11,5‰ per le durate di esposizione di 15, 30 o 60 minuti. Il ciclo cellulare non è cambiato e le cellule binucleate non hanno mostrato differenze significative; nemmeno la temperatura è aumentata. I ricercatori sottolineano che la nevralgia, il danno vascolare nel sistema nervoso e la mortalità per cancro si verificano più frequentemente nei tecnici radar. Raccomandano di implementare misure protettive contro le radiazioni non ionizzanti.

**Maurizio GIANI**  
**Presidente Associazione C.C.E.**  
**Comuni Contro Elettrosmog**



**San Diego (CALIFORNIA)**  
**6-marzo-2025**