



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA BIOMÉDICA E INSTRUMENTACIÓN

**Impacto de la exposición a campos electromagnéticos por los
teléfonos móviles en la motilidad espermática**

Proyecto Final de graduación presentado como requisito para optar por el título de
LICENCIATURA EN INGENIERÍA BIOMÉDICA E INSTRUMENTACIÓN en la
Universidad Latina de Panamá

Jendall Antonio Barria Quiñones
C.I.P 8-914-283

Director de Tesis:
Dr. Ernesto Ibarra

Asesor de Tesis:
Mgtr. Alfredo Lescher

Panamá, República de Panamá

2025

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado a todas las personas que me han apoyado y acompañado a lo largo de mi carrera.

En especial, dedico este trabajo a mi tía Verónica Barría y a mi abuela Hilaria Barría, por creer en mí, por su cariño incondicional y por todos esos consejos que me han guiado hasta este momento.

También agradezco profundamente a toda mi familia y amigos, por estar a mi lado, animarme en los días difíciles y celebrar cada pequeño logro conmigo.

Agradezco de corazón al Dr. Ernesto Ibarra, mi director de tesis, por su orientación constante, sus observaciones certeras y por confiar en mi trabajo desde el inicio.

Hoy cierro esta etapa con orgullo, sabiendo que cada esfuerzo valió la pena. Recuerda siempre de lo que eres capaz, incluso cuando las fuerzas flaqueen. Sigue adelante y demuestra que puedes.



UNIVERSIDAD LATINA DE PANAMÁ

DECLARACIÓN JURADA

Yo Jendall Antonio Barria Quiñones con cédula de identidad personal 8-914-283, estudiante graduando del programa/carrera de Licenciatura en Ingeniería Biomédica e Instrumentación declaro bajo la gravedad del juramento que el material que aparece en este trabajo de graduación, en la opción: Publicación Científica (tesis, proyecto final, pasantía, otro), es de mi producción intelectual, por lo cual exonero a la Universidad Latina de Panamá de cualquier responsabilidad relacionada a este aspecto.

Para que conste firmo la presente declaración el día 30 de julio del año 2025.

Firma del estudiante: 

Cédula: 8-914-283

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO I.	7
1.0. El Problema	8
1.1. Antecedentes del problema de investigación.....	8
1.2. Planteamiento del problema	8
1.3. Justificación de la Investigación.....	9
1.4. Objetivo.....	9
1.4.1. Objetivo General	9
1.4.2. Objetivos Específicos.....	9
1.5. Alcance y Límite de la Investigación	10
1.6. Línea de Investigación a la que pertenece el Estudio.....	10
CAPÍTULO II.	12
2.0. Marco teórico	12
2.1. Antecedentes de investigaciones realizadas en el tema.....	12
2.2. Bases teóricas que sustentan la investigación.....	13
CAPÍTULO III.	21
3.0 Marco Metodológico.....	22
3.1 Tipo y Diseño De La Investigación.....	22
CAPÍTULO IV	23
4.0. Análisis e Interpretación De Los Resultados.....	24
CONCLUSIONES.....	38
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I Efectos de los campos ionizante y no ionizante.....	12
Tabla II Comparación de niveles de absorción por el SAR	15
Tabla III Clasificación de los tipos de motilidad espermática	17
Tabla V Relación dosis – respuesta en la motilidad espermática	26
Tabla V Resultados obtenidos en los estudios analizados	28

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Fig. 1 Partes principales del espermatozoide	16
Fig. 2 Impacto de RF-EMR en la calidad del semen: ROS y motilidad espermática ...	18
Fig. 3 Resultados obtenido de los efectos histopatológicos y moleculares a la exposición de ELF-EMF de 50 Hz en los testículos de ratas durante diferentes periodos de tiempo. (Çetkin, Kızıllan, & Demir, 2017).	27
Fig. 4 Impacto de la exposición a RF-EME en la viabilidad y motilidad de los espermatozoides. (Assefa & Abdu, 2024).	33

INTRODUCCIÓN

Este estudio examina los efectos negativos de los campos electromagnéticos (CEM) en la motilidad espermática, centrándose en su impacto fisiológico. Se realizó una revisión sistemática seleccionando documentos relevantes de bases de datos científicos en revistas como Pubmed, Google Scholar, IEEE Xplore y Scielo. Aplicando criterios rigurosos de inclusión y exclusión. Según los estudios analizados, la exposición a CEM, incluyendo la radiación electromagnética de radiofrecuencia (RF-EMR), perjudica la motilidad espermática al inducir estrés oxidativo mitocondrial, lo que reduce la producción de ATP y altera la calidad del esperma. Este fenómeno sigue un mecanismo clave detrás del deterioro de la fertilidad masculina relacionado con los CEM. Este artículo busca profundizar en los mecanismos para entender mejor cómo afectan a la reproducción. Los hallazgos resaltan la necesidad de más estudios para medir y evaluar riesgos.

Palabras Clave — Radiación electromagnética, motilidad espermática, hiperactivación, fertilidad masculina.

CAPÍTULO 1. EL PROBLEMA

CAPÍTULO I.

1.0. El Problema

1.1. Antecedentes del problema de investigación

La infertilidad es definida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como la incapacidad de lograr un embarazo, luego de 12 meses de mantener relaciones sexuales sin protección (Maluin, Osman, Jaffar, & Ibrahim, 2021). A nivel mundial entre el 8-12 % de las parejas en edad fértil padecen de problemas de fertilidad (Organización Mundial de la Salud, 2025). En donde un promedio del 20-30% de los problemas de fertilidad son atribuibles al hombre, pudiendo llegar hasta un 50 % (OMS, 2025). En este contexto, el hombre juega un papel vital en la fertilidad, pero diferentes factores pueden alterar la producción y buen rendimiento de los espermatozoides (Koohestanidehaghi, Khalili, Dehghanpour, & Seify, 2024). Entre ellos se encuentran la edad (Magalhães, Ribeiro, Rego, & Andrade, 2021), genética (Krausz & Riera-Escamilla, 2018), obesidad (Eisenberg, Kim, Chen, Sundaram, Schisterman, & Buck Louis, 2014), tabaquismo (Taha, Ez-Aldin, Sayed, Ghandour, & Mostafa, 2012), consumo de alcohol (Ricci, Al Beitawi, Cipriani, Candiani, Chiaffarino, Viganò, Noli, & Parazzini, 2017) y la exposición a la radiación electromagnética de radiofrecuencia (RF-EMR) (Gautam, Priyadarshini, Nirala, & Rajamani, 2021).

1.2. Planteamiento del problema

El rápido desarrollo de las tecnologías de comunicación con antenas ha generado preocupación sobre los posibles efectos de los campos electromagnéticos (CEM) en la salud reproductiva masculina (Falzone, Huyser, & Franken, 2010). Mediante la viabilidad de mecanismos térmicos y no térmicos, se ha evaluado el impacto de los CEM en la capacidad de los espermatozoides de mantener su funcionalidad óptima y en la integridad del ADN (Alchalabi, Ali, & Malik, 2020). Particularmente, la RF-EMR emitida por teléfonos móviles, operando típicamente entre 800-2200 MHz, ha sido asociada con alteraciones en parámetros seminales clave (Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes, 2020).

1.3. Justificación de la Investigación

Estudios recientes sugieren que la RF-EMR podría afectar negativamente el movimiento, viabilidad, morfología y concentración de los espermatozoides (Falzone et al., 2010) (Bhat, 2013). Considerando la relevancia clínica de la infertilidad masculina, es esencial aclarar el rol de los CEM en la viabilidad de los espermatozoides (Kivrak, Yurt, Kaplan, Alkan, & Altun, 2017). En este sentido, estudios tanto in vitro como in vivo han demostrado que la RF-EMR generada por dispositivos móviles puede causar estrés oxidativo en los espermatozoides, lo que conlleva un incremento en la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y daño en el ADN espermático (Kivrak et al., 2017). Por ejemplo, Agarwal et al. observaron una reducción considerable en la motilidad y viabilidad espermática en hombres que usaban teléfonos móviles por más de cuatro horas al día (Agarwal, Desai, Makker, Varghese, Mouradi, Sabanegh, & Sharma, 2009). Sin embargo, De Iuliis et al. indicaron que la exposición a RF-EMR disminuye la motricidad y vitalidad de los espermatozoides, al mismo tiempo que aumenta la fragmentación del ADN (De Iuliis, Newey, King, & Aitken, 2009).

1.4. Objetivo

1.4.1. Objetivo General

Analizar el impacto de los campos electromagnéticos de radiofrecuencia (RF-EMR) en la motilidad y viabilidad espermática masculina, considerando factores de exposición y mecanismos moleculares involucrados.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Revisar estudios existentes que expongan las afecciones en espermatozoides por la exposición a RF-EMR.
- Estudiar la relación entre la duración de la exposición a CEM y la calidad espermática.
- Examinar los resultados obtenidos brindando así información útil para futuros estudios experimentales.

1.5. Alcance y límite de la investigación

El alcance de esta investigación se centra exclusivamente en la revisión de literatura científica relacionada con los efectos de la radiación electromagnética (CEM) sobre la motilidad espermática en humanos. La búsqueda y selección de los documentos se realizó en bases de datos científicos especializados, considerando los estudios más recientes y relevantes publicados a partir del año 2020. Los artículos incluidos abordan principalmente los mecanismos biológicos mediante los cuales la exposición a CEM puede influir en la calidad seminal, haciendo énfasis en la motilidad espermática como uno de los principales indicadores de fertilidad masculina. Asimismo, se consideraron investigaciones relacionadas con la exposición a fuentes de CEM de uso cotidiano, como teléfonos móviles y dispositivos electrónicos, con el objetivo de ofrecer una perspectiva actualizada y contextualizada sobre el tema. Esta revisión no contempla estudios que analicen otras causas de infertilidad masculina no relacionadas con los CEM, ni aquellos que se centren exclusivamente en modelos animales sin correlación directa con el cuerpo humano.

Los estudios actuales presentan varias limitaciones significativas. Iniciando con que la mayoría de las investigaciones se han realizado in vitro o en modelos animales (De Iuliis et al. (2009) (Shahin et al., 2019). Limitando así la extrapolación directa de los hallazgos a modelos humanos. Como señalan Maluin et al, las diferencias anatómicas y fisiológicas entre especies pueden afectar la absorción de energía y la respuesta biológica a la RF-EMR, lo que subraya la necesidad de estudios epidemiológicos robustos en poblaciones humanas (Maluin et al., 2021). Otra limitación crítica es la variabilidad metodológica entre estudios, particularmente en los protocolos de exposición. Puesto que algunos investigadores utilizan dispositivos estándar para generar campos electromagnéticos controlados (De Iuliis et al. (2009), otros emplean teléfonos móviles comerciales (Çetkin et al., 2017).

1.6 Línea de Investigación a la que pertenece el Estudio

El estudio presentado pertenece a la línea de investigación en ciencias de la salud, específicamente en el tema de Ingeniería Clínica y Biomédica, la cual trata del impacto de la exposición a campos electromagnéticos por los teléfonos móviles en la motilidad espermática.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO II.

2.0. Marco teórico

2.1. Antecedentes de investigaciones realizadas en el tema

Los CEM se dividen en ionizantes y no ionizantes, siendo estos últimos los que cobran mayor referencia en la vida diaria debido a su gran presencia en dispositivos como teléfonos móviles. En diferencia de la radiación ionizante, que puede dañar directamente el ADN, está asociada a procedimientos médicos como radioterapia y tomografías, en este contexto, la RF-EMR genera preocupación por sus efectos acumulativos en la salud reproductiva masculina (Kesari, Agarwal, & Henkel, 2018). En la TABLA I, Se muestra como la exposición prolongada a los campos electromagnéticos de radiofrecuencia (RF-EMF) reduce la calidad del semen, afectando así la motilidad, morfología y viabilidad de los espermatozoides, e incrementa el estrés oxidativo y la fragmentación del ADN espermático (Pacchierotti et al., 2021) (Wdowiak et al., 2019). Mientras que la radiación ionizante tiene umbrales de daño claros. Ejemplo: 0.1–6 Gy para infertilidad temporal o permanente (Chougule & Joan, 2025), los efectos de la no ionizante son más sutiles pero persistentes (Pacchierotti et al., 2021).

Tabla I *Efectos De Los Campos Ionizante Y No Ionizante*

<i>Tipo de radiación</i>	<i>Fuente comunes</i>	<i>Efectos en salud reproductiva masculina</i>
No Ionizante	Teléfonos móviles, Wi-Fi, microondas	Alternación de la morfología espermática.
		Disminución de conteo y motilidad espermática.
		Aumento de estrés oxidativo y fragmentación de ADN. Infertilidad
Ionizante	Rayos X, Angiografía, Radioterapia, Tomografía computarizada.	Disrupción hormonal y apoptosis celular

<i>Tipo de radiación</i>	<i>Fuente comunes</i>	<i>Efectos en salud reproductiva masculina</i>
		Daño directo al ADN y mutaciones.

Nota. Tabla construida a partir de los aportes de Pacchierotti et al., (2021), Wdowiak et al., (2019), Chougule & Joan, (2025) y Agencia Internacional de Energía Atómica, (1996).

En este sentido, los teléfonos móviles operan con antenas que transmiten CEM no ionizantes, y con el tiempo, estas tecnologías de transmisión de datos han evolucionado considerablemente (Levitt, Lai, & Manville, 2022). Entre las tecnologías, podemos mencionar la 1G o sistema telefónico avanzado para móviles (AMPS), que solo permitía realizar llamadas de voz a una frecuencia de 800 MHz (Stüber, 2017). Posteriormente, surgió la tecnología 2G o sistema global para comunicaciones móviles (GSM), que incorporó las funciones de envío de texto y acceder a internet. Sus frecuencias podían variar entre una combinación de 850-1900 MHz o 900-1800 MHz, dependiendo del dispositivo móvil (Stüber, 2017). Con el paso del tiempo, se incorporó la tecnología 3G o Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS). Entre sus características destacan la transferencia de datos, la conexión a internet y las videollamadas. Este sistema opera en un rango de frecuencias de 800-900 MHz o 1700-2100 MHz, dependiendo del operador (Stüber, 2017). Los avances tecnológicos dieron paso a la 4G o evolución a largo plazo (LTE), trabajan en bandas de frecuencia de 700 MHz, 1700/2100 MHz y 2500-2690 MHz. Entre sus principales características, destacan el aumento de velocidad en el acceso a internet, las videoconferencias y la transmisión en alta definición (HD) (Stüber, 2017). En la actualidad, contamos con la tecnología más avanzada en transmisión de datos: el 5G. Este sistema ha sido diseñado para optimizar la comunicación entre dispositivos y expandir el internet de las cosas (IoT). Opera en un rango de frecuencias de 30-100 GHz, con la posibilidad de alcanzar frecuencias de hasta 300 GHz (Fagbohun, 2014).

2.2. Bases teóricas que sustentan la investigación.

La Tasa de Absorción Específica (SAR) mide la energía de radiofrecuencia (RF) absorbida por el cuerpo humano debido a la exposición a CEM (Grupo de Trabajo de la

IARC, 2002). El SAR se expresa en unidades de vatios por kilogramo (W/kg) y es una medida utilizada para evaluar la seguridad de dispositivos móviles (Comisión Federal de Comunicaciones, 1997). Según el procedimiento de las normas, el valor del campo eléctrico se mide con una sonda miniatura de campo eléctrico. De hecho, las sondas de campo eléctrico/antena monopolar son el sensor más adecuado para medir el SAR, debido a su sensibilidad y rápida respuesta (Kesari, Kumar, Nirala, Siddiqui, & Behari, 2013). El SAR (W/kg) se relaciona con el campo eléctrico, en una muestra de conductividad s (s/m), y densidad ρ (kg/m^3) por la siguiente formula:

$$SAR = \sigma |E|^2 \frac{2}{\rho} (\text{Wkg} - 1)$$

Donde E es la intensidad del campo localizado de la raíz-cuadrada medida en V/m (Kesari et al., 2018). El límite máximo de la tasa de absorción específica para prevenir efectos térmicos graves que debe adoptar la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) es de 1.6 W/kg promediado sobre 1 gramo de tejido (Görski, Kotwicka, Skibińska, Jendraszak, & Wosiński, 2020). La energía de RF absorbida depende de factores como la frecuencia, la densidad de potencia y la distancia de la fuente de radiación (Agarwal et al., 2009). Los valores de SAR elevados representan más energía absorbida y un potencial de mayor calentamiento en los tejidos y posiblemente la presencia de efectos fisiológicos, Siendo así la profundidad de penetración una preocupación en la exposición al CEM (Koohestanidehaghi et al., 2024). En la TABLA II se observa una comparativa de absorción por SAR de los diferentes tipos de tejidos biológicos y modelos experimentales bajo exposición a CEM. En esta se evidencian mayores niveles de absorción en espermatozoides comparados con tejidos musculares, rígidos y blandos. Se refleja la sensibilidad a la RF, especialmente en el rango 900 MHz a 2.45 GHz. En la actualidad, investigaciones indican que la exposición prolongada a CEM de RF puede aumentar las ROS en los espermatozoides, lo que provoca fragmentación del ADN y reducción de la movilidad espermática (Koohestanidehaghi et al., 2024). En cuanto al SAR la distribución espacial del cuerpo no es uniforme, con mayores tasas de absorción cerca de la piel y disminución en la profundidad (Blank & Goodman, 1999). Con estos factores la distribución desigual complica la evaluación de los impactos biológicos a largo plazo,

especialmente en órganos internos como los testículos (Christ et al., 2006). En este sentido los componentes eléctricos como los magnéticos del CEM interactúan con el tejido biológico humano, siendo el campo electromagnético el que se absorbe con mayor facilidad (Iulius et al., 2009). Se ha demostrado que el CEM de RF emitido por un teléfono móvil colocado en el bolsillo puede actuar sobre los testículos y afectar la calidad del espermatozoide en respuesta a la proximidad de la fuente de radiación (Agarwal et al., 2011). Las propiedades dieléctricas de los tejidos. Por ejemplo, los tejidos altos en agua, como el músculo, absorben más energía de RF que los tejidos grasos (Kesari & Behari, 2010). Según un informe de 2021 del Parlamento Europeo, el CEM de RF emitido por teléfonos móviles es probablemente carcinogénico y perjudicial para la fertilidad masculina (Nyberg et al., 2023).

Tabla II Comparación de niveles de absorción por el SAR

Tipo de tejido/Modelo	Frecuencia (MHz/GHz)	SAR (W/kg)	Resultado sobre fertilidad o calidad seminal
Espermatozoide humano (<i>in vitro</i>)	900-2450 MHz	1.0-2.8	Disminución leve en la vitalidad espermática
Espermatozoide de rata (modelo animal)	900 MHz – 2.45 GHz	0.9 – 1.8	Disminución en motilidad, aumento de apoptosis
Tejido muscular	900 MHz	0.15-0.4	Absorción moderada
Tejido Blando (Piel, tejido conectivo)	900 MHz	0.1-0.2	Baja absorción
Tejido Oseo (tejido rígido)	900 MHz	0.01- 0.03	Mínima absorción

Nota. Tabla construida a partir de los aportes de Cordelli et al. (2024), Kesari, Kumar y Behari (2012), Christ et al. (2006) y Sun, Dai y Zhang (2018).

Morfología y motilidad del espermatozoide

El espermatozoide es la célula reproductora masculina (Jodar et al., 2013) . Su función principal es transportar el ADN paterno hasta el ovocito (Jodar et al., 2013). En la Fig. 1 se observan las tres partes principales en que se divide el espermatozoide:

cabeza, cuello y flagelo (Henkel & Schill, 2003). En la cabeza se encuentra el núcleo con el ADN y se encuentra cubierta por el acrosoma, esencial para la fecundación. El cuello une la cabeza al flagelo y contiene el centriolo, clave para la organización del axonema (Saacke, 2008). La pieza intermedia contiene mitocondrias dispuestas helicoidalmente que suministra energía (ATP) para el movimiento del flagelo (Aitken, 2006). El flagelo es responsable de la motilidad espermática, constituido por el axonema con patrón 9+2 de microtúbulos (Cheng et al., 2019). La motilidad espermática es uno de los factores tomados en cuenta al momento del análisis de la calidad del semen y es una pieza importante para la fertilización (Kumar & Singh, 2015). El espermatozoide es una célula con la capacidad de desplazarse por el tracto reproductivo femenino y fecundar un ovocito (Dcunha et al., 2022). Algunos parámetros seminales que se toman en cuenta para evaluar en muestras son: la concentración, siendo el número de espermatozoides que hay por unidad de volumen de semen (Franken & Oehninger, 2012). Y la viabilidad, refiriéndose a la proporción de espermatozoides que están vivos en una muestra. (Momeni, Abnosi, & Eskandari, 2020).

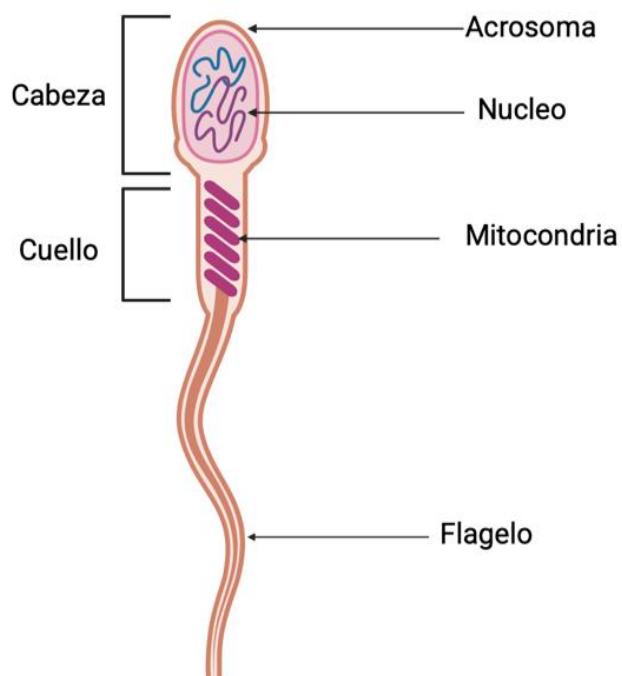


Fig. 1 Partes principales del espermatozoide

La fecundación está condicionada a la motilidad espermática. En la TABLA III se muestra cómo se clasifican los tipos de motilidad que tienen los espermatozoides, para

este proceso de fecundación los espermatozoides deben poseer una movilidad tipo A (Stephens, Arnett, & Meacham, 2013).

Tabla III Clasificación De Los Tipos De Motilidad Espermática

Tipos	Movimiento
Tipo A (Rápida Progresiva)	Movimiento hacia adelante y lineal
Tipo B (Lenta Progresiva)	Movimiento hacia adelante lento y menos lineal
Tipo C (No Progresiva)	Movimiento ondulatorio o en círculos, sin avance significativo.
Tipo D (Inmóvil)	Sin movimiento detectable

Nota. Tabla construida a partir de los aportes de (Stephens, Arnett, & Meacham, 2013).

Por lo tanto, la motilidad espermática toma un rol importante para evaluar la fertilidad de una muestra de semen (Gaffney et al., 2011). Según la OMS, los valores de referencias para un análisis seminal normal incluyen: volumen del semen de al menos 1.5 ml, un total de 39 millones de espermatozoides por eyaculación, una concentración de espermatozoides de 15 M/ml, con una motilidad total del 40%, motilidad progresiva del 32% y un porcentaje de formas morfológicamente normales no inferior del 4% [45]. En diferentes estudios se justifica que el estilo de vida y otros factores ambientales pueden conducir a la infertilidad masculina afectando la motilidad en los espermatozoides, por ejemplo: varicocele (Agarwal et al., 2016), anomalías genéticas (Leigh et al., 2009), anomalías mitocondriales (Selvi Rani et al., 2006), Abstinencia sexual (Comar et al., 2017), estrés psicológico (Durairajanayagam, 2018) y radiación (Kesari et al., 2018). siendo este último el factor de interés en la presente investigación.

Efectos biológicos del uso del teléfono celular en la fertilidad humana

El uso de RF-EMR en los teléfonos móviles pueden llegar a manipular los espermatozoides mediante dos mecanismos clave: efectos térmicos y no térmicos (Habash, 2007). Al ser absorbido por el cuerpo, parte de la energía se transforma en calor, con eso siendo el efecto térmico. El tamaño de calor producido aumenta

directamente en función de la SAR y de la densidad de potencia de la radiación (Kowalczyk, Saunders, & Stapleton, 1983). Estudios demuestran que, al superar los umbrales de este calor, puede empezar a dañar las células (Agarwal, Singh, Hamada, & Kesari, 2011). Los testículos en el hombre mantienen una temperatura aproximadamente 2°C menor que la corporal esto es para garantizar una espermatogénesis adecuada (Agarwal et al., 2011). El aumento de temperatura por exposición a RF-EMR puede dañar el ADN espermático, provocando la muerte celular programada (apoptosis) y alterar la estructura de los túbulos seminíferos donde se producen los espermatozoides (Koppers et al., 2008). Por otro lado, los efectos no térmicos son quizás más preocupantes, ya que ocurren incluso sin calentamiento significativo (Repacholi, 1998). Estos incluyen: generación de estrés oxidativo, alteraciones en el potencial de membrana espermático, cambios en las vías de señalización celular, modificaciones en los procesos de proliferación y muerte celular (Repacholi, 1998). En la Fig. 2 se muestra como la RF-EMR en teléfonos móviles puede aumentar el estrés oxidativo, provocando así afectaciones en la función mitocondrial. Comprometiendo su capacidad en la producción de ATP reduciendo significativamente la motilidad espermática (Liu et al., 2014). En este sentido es importante mencionar que los espermatozoides son vulnerables al estrés oxidativo porque carecen de sistemas antioxidantes robustos, ya que contienen abundantes ácidos grasos poliinsaturados en sus membranas (Agarwal & Said, 2005).

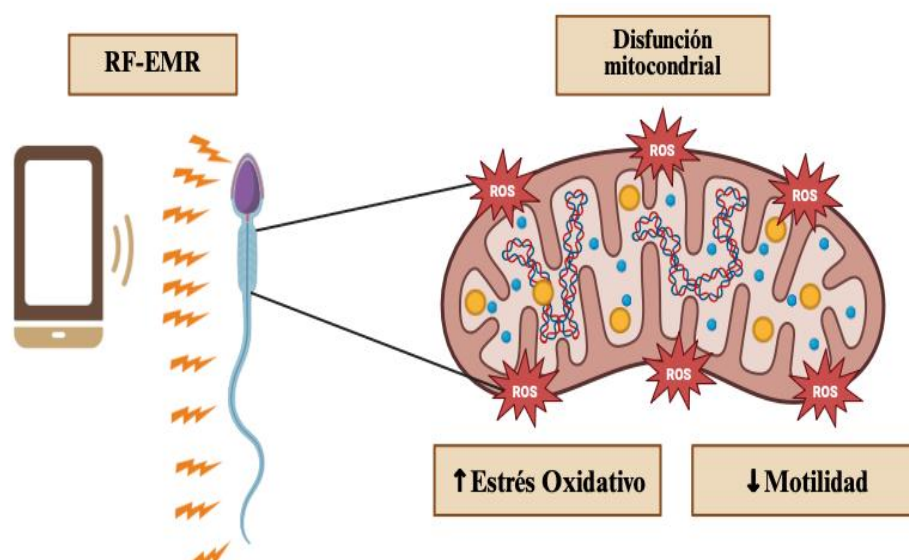


Fig. 2 Impacto de RF-EMR en la calidad del semen: ROS y motilidad espermática

En este sentido es importante mencionar que los espermatozoides son vulnerables al estrés oxidativo, porque carecen de sistemas antioxidantes robustos, ya que contienen abundantes ácidos grasos poliinsaturados en sus membranas (Agarwal et al., 2005). Además, son muy sensibles al daño oxidativo (Agarwal et al., 2005) (Gavriliouk & Aitken, 2015). La radiación activa enzimas como la NADH oxidasa en la membrana plasmática, generando especies ROS (Salama, 2008). Por lo tanto, con exposiciones prolongadas, la producción de ROS supera la capacidad antioxidante natural, lo que provoca daños al ADN espermático que pueden afectar la fertilidad (Gorpinchenko et al., 2014).

Efectos fisiológicos del CEM en los espermatozoides

Estudios en animales han demostrado que los CEM pueden presentar efectos genotóxicos y conducir a un daño significativamente mayor del ADN en ratas después de la exposición a campos magnéticos de 60 Hz, 10 μ T durante 24 o 48 horas (Lai & Singh, 1997). En humanos, también se ha reportado que los EMF de 50 Hz elevan las frecuencias de intercambios de cromátidas hermanas en los linfocitos (Wahab et al., 2007). Yu G et al. (2021) muestran que al tener exposición a RF-EMR puede reducir la motilidad de los espermatozoides tanto en humanos como en animales. Se identificaron diferencias regionales, siendo más pronunciados los efectos negativos en Europa del Este y Asia Occidental. Se sugiere que la RF-EMR induce disfunción mitocondrial en los espermatozoides, aumentando la producción de ROS y provocando daño oxidativo al ADN, lo que afecta negativamente la motilidad espermática (Houston et al., 2016). El ROS se genera principalmente en la membrana interna de la mitocondria durante fosforilación oxidativa, este es un proceso vital para la generación de energía celular (Murphy, 2009). En este proceso, actúan complejos proteicos en conjuntos para la transferencia de electrones, que son proporcionados por el NADH, hacia el oxígeno molecular (O_2). Este traslado de electrones se complementa con bombeo activo de protones (H^+) desde la matriz mitocondrial a la intermembrana, esto genera un potencial en la membrana mitocondrial. Esta interacción de los protones genera el ATP cuando los protones vuelve a la matriz a través del complejo enzimático V (Li et al., 2013).

En otras condiciones de estrés o difusión, los electrones se dispersan de la cadena de transporte mitocondrial, dando lugar a la formación parcial de superóxido (O_2^-). Este

radical se puede liberar hacia la matriz mitocondrial como hacia el espacio de la intermembrana, particularmente desde los complejos I y III (Madamanchi & Runge, 2007). En reacción a esto, las enzimas superóxido dismutasas (SOD) transforman de manera inmediata el (O_2^-) en peróxido de hidrógeno (H_2O_2), que posteriormente se reduce a agua (H_2O) por el glutatión peroxidasa (GPX). Sin embargo, tanto el (O_2^-) y el (H_2O_2) se consideran como ROS mitocondriales, y su alto nivel puede atribuir al daño oxidativo de la membrana del espermatozoide. Además, el (O_2^-) puede tener una reacción con el óxido nítrico (NO) para formar ($ONOO^-$), lo que puede aumentar el daño celular (Cadenas & Davies, 2000). Esta acción trae repercusión en el flagelo, ya que la energía mitocondrial lo impulsa y mientras menos ATP, menos propulsión tendrá (Amaral, 2022). La membrana plasmática es vulnerable al daño oxidativo alterando su fluidez y funcionabilidad (De Iuliis et al., 2009). El ADN ubicado en la cabeza espermática se puede fragmentar por causa de la RF-EMR reduciendo la calidad genética (Sciorio, Tramontano, & Esteves, 2022). Diversos estudios sugieren que los espermatozoides son altamente vulnerables al estrés oxidativo debido al elevado nivel de ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) en su membrana (Kenny et al., 2024). La sobreproducción ROS puede impulsar la reacción acrosómica prematura, afectando negativamente la fertilización (Dutta, Majzoub, & Agarwal, 2019). El estrés oxidativo altera la integridad de la membrana acrosómica, arriesgando su capacidad de fusión con la zona pelúcida (Agarwal, Gupta, & Sharma, 2005). Los ROS peroxidan lípidos en la membrana que recubre el acrosoma, lo que interfiere con la liberación enzimática necesaria para la penetración del ovocito (Aitken, Drevet, Moazamian, & Gharagozloo, 2022). La estructura acrosómica es altamente vulnerable a la peroxidación lipídica inducida por ROS debido a su alto contenido en ácidos grasos poliinsaturados (De Iuliis et al., 2009). La exposición sostenida a ROS puede causar una disminución en la expresión de proteínas acrosómicas funcionales, lo que reduce la competencia fecundante del espermatozoide (Morielli & O'Flaherty, 2015).

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

CAPÍTULO III.

3.0 Marco metodológico

3.1 Tipo y diseño de la investigación

En función del objetivo del presente estudio, se realizó una revisión sistemática y actualizada sobre la motilidad espermática y los efectos de los campos electromagnéticos (CEM) en el cuerpo humano. Para ello, se llevaron a cabo búsquedas exhaustivas en bases de datos científicas reconocidas, tales como PubMed, Google Scholar, Scielo e IEEE Xplore, con el propósito de abarcar una cobertura amplia y relevante de la literatura científica. Inicialmente, se identificaron más de 45,000 publicaciones relacionadas con los temas de interés. Para refinar la búsqueda, se aplicaron filtros temporales considerando únicamente los estudios publicados a partir del año 2020 hasta la fecha, con el fin de garantizar la actualidad de la información. Asimismo, se establecieron filtros adicionales según el tipo de publicación, excluyendo revisiones narrativas o artículos sin metodología científica verificable. En cuanto a la estrategia de búsqueda, se utilizaron términos clave como: *“radiación electromagnética”*, *“motilidad espermática”*, *“fertilidad humana”*, *“exposición a campos electromagnéticos”* y *“telefonos móvil”*, en combinación con operadores booleanos (AND, OR) para realizar un filtrado preciso de los estudios más relevantes. Se excluyeron investigaciones que no aportarán datos específicos al objetivo de la revisión, así como aquellas publicadas antes del 2020. Posteriormente, se realizó un proceso de evaluación crítica, iniciando con la lectura de títulos, resúmenes y conclusiones, seleccionando los artículos que presentaran mayor pertinencia temática. Los documentos seleccionados fueron analizados de forma integral para extraer datos metodológicos, resultados y conclusiones significativas. Finalmente, se procedió a la extracción y síntesis de información, sistematizando los hallazgos más relevantes que permitieran comprender el impacto de la exposición a campos electromagnéticos sobre la motilidad espermática. Como resultado del proceso de filtrado, evaluación y selección, se incluyeron un total de 103 artículos científicos que cumplieron con los criterios establecidos.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV

4.0. Análisis e interpretación de los resultados

Los estudios seleccionados, como se muestra en la Tabla VI, abarcan diversas metodologías. Incluyendo modelos in vitro, siendo el 60% de los casos con exposición directa de espermatozoides a campos electromagnéticos; por otro lado, modelos in vivo con un 40% utilizando principalmente roedores como sujetos experimentales, y algunas observaciones clínicas en poblaciones humanas. Los parámetros clave analizados muestran que las frecuencias empleadas se distribuyen equitativamente entre bajas 850-1000 MHz siendo un 50% de estudios realizados y altas entre 1800-2200 MHz, siendo también un 50% analizados, con intensidades de radiación SAR que varían desde 0.1 hasta 27.5 W/kg, aunque la mayoría de estos casos se concentran en el rango de 1-2 W/kg, correspondiente a la exposición típica de dispositivos móviles convencionales. En cuanto a la población objetivo, los estudios in vitro utilizan principalmente muestras de semen humano, mientras que los in vivo emplean modelos animales como ratas Wistar o ratones C57BL/6. Los protocolos de exposición presentan variaciones significativas: el 30% son exposiciones agudas ≤ 1 hora, el 50% de mediano plazo 1 hora a 30 días y 20% crónicas >30 días, observándose que las exposiciones prolongadas generan efectos más severos en los parámetros espermáticos. Sin embargo, aproximadamente el 40% de los estudios presentan limitaciones metodológicas al no especificar completamente parámetros clave como la distancia de exposición, la modulación de la señal o las condiciones ambientales de control.

Impacto de la radiación electromagnética en la motilidad espermática

Los CEM de baja frecuencia (50 Hz) han evidenciado la disminución con alto impacto en la motilidad espermática. Górski et al. en un estudio in vitro, mostraron que, tras 30 min. de exposición, la motilidad Tipo A tuvo una disminución significativa en presencia de CEM. Sin embargo, al utilizar las pantallas dielécticas se redujo los efectos negativos, manteniendo la motilidad espermática normal. Estos resultados indican que las alteraciones en los espermatozoides, específicamente en los microtúbulos y la ROS en menor escala pueden variar según el nivel de frecuencia que se expongan los espermatozoides (Górski et al., 2020). Por otro lado, la exposición a RF-EMR de 1.8

GHz, típica de los teléfonos móviles, evidenció un impacto significativo en la calidad de los espermatozoides (Kaur, Rai, & Singh, 2023). Según la investigación de Luiis et al. los espermatozoides expuesto a niveles de SAR 1.0 W/kg dio como resultado a una disminución de la motilidad de $86\% \pm 2\%$ a $68\% \pm 2\%$ ($p < 0.05$) y la vitalidad de $89\% \pm 3\%$ a $65\% \pm 1\%$ ($p < 0.01$); en estas disminuciones se observaron parámetros de SAR hasta de 4.3 W/kg, estos efectos alcanzaron un efecto por encima de lo normal manteniéndose estable en estas condiciones, esto indica que en la muestra estudiada se encontró un grupo de espermatozoides afectados por la exposición (De Iuliis, Newey, King, & Aitken, 2009).

Relación dosis – Respuesta en la motilidad espermática

En la Tabla V se presenta una relación directa entre los parámetros de exposición a RF-EMR y los efectos sobre la calidad espermática. En los teléfonos móviles entre 850MHz-4GHz, tomando el rango SAR de 0.42-2.1 W/kg con exposiciones desde 1 hora hasta 6 años provoca disminución en la motilidad y aumento de anomalías morfológicas y estrés oxidativo. Por otro lado, los generadores de RF-EMR a 900MHz - 27.5GHz presentan un rango más amplio de SAR que varía entre 0.4 - 27.5 W/kg mostrando daños agudos en menos de 24 horas, cuando se superan a 2 W/kg. Sin embargo, exposiciones prolongadas a 5 semanas a intensidades moderadas afectan parámetros hormonales y la calidad del semen. Es importante mencionar que estos hallazgos revelan que la combinación de frecuencia, intensidad del SAR y tiempo de exposición determina la severidad del impacto, siendo especialmente relevantes las exposiciones prolongadas mayores a 30 días incluso a SAR moderados 0.4 - 2 W/kg), niveles comunes en el uso cotidiano de dispositivos móviles. Los estudios revisados demuestran una correlación entre la dosis de exposición RF-EMR y los efectos adversos sobre la motilidad espermática. Esta relación se presenta tanto en la intensidad SAR, como en la duración de la exposición, donde los niveles más altos prolongados se asocian con mayores alteraciones y tiempo de exposición, por ende, se observan efectos más pronunciados asociándose con mayores alteraciones en los parámetros seminales.

Tabla IV Relación Dosis – Respuesta en la Motilidad Espermática

Fuente RF- EME	Rango de Frecuencia	Rango de Tiempo de Exposición	Rango de SAR (W/kg)	Efectos Observados	Cantidad de Estudios
<i>Teléfonos móviles</i>	850 MHz – 42 GHz	1h – 6 años	0.42 - 2.1	Disminución de la motilidad progresiva, Aumento de anomalías morfológicas y aumento del estrés oxidativo	12
<i>Generadores de RF-EME</i>	900MHz – 1.8 GHz	16 h – 8 semanas	0.4 - 27.5	Disminución de la calidad espermática, daño en el ADN y Alteraciones hormonales	3

Estrés oxidativo y daño celular

Los estudios presentan la evidencia de que la radiación genera ROS, lo que contribuye al daño celular y perjudica la calidad del espermatozoide. El exceso de ROS produce estrés oxidativo comprometiendo la integridad funcional del espermatozoide (Singh, Nath, Mathur, & Sharma, 2018). Este proceso afecta directamente las mitocondrias, disminuyendo la producción de ATP. También tiene efectos directos como el aumento en la fragmentación genética, oxidación de la membrana lipídica, daños en el ADN y proteínas que como consecuencia disminuye la viabilidad y la motilidad espermática

(Shahin et al. 2019). En la TABLA V se muestran estudios in vitro con células espermáticas humanas (De Iuliis et al., 2009), se reportó un incremento de ROS y daño mitocondrial tras exposiciones a frecuencias de 2900 MHz, con niveles de SAR entre 1 y 3 W/kg (Agarwal et al., 2008), incluso con tiempos de exposición relativamente cortos. Estos hallazgos refuerzan la hipótesis que la RF-EMR actúa como un desencadenante de estrés oxidativo en células germinales masculinas.

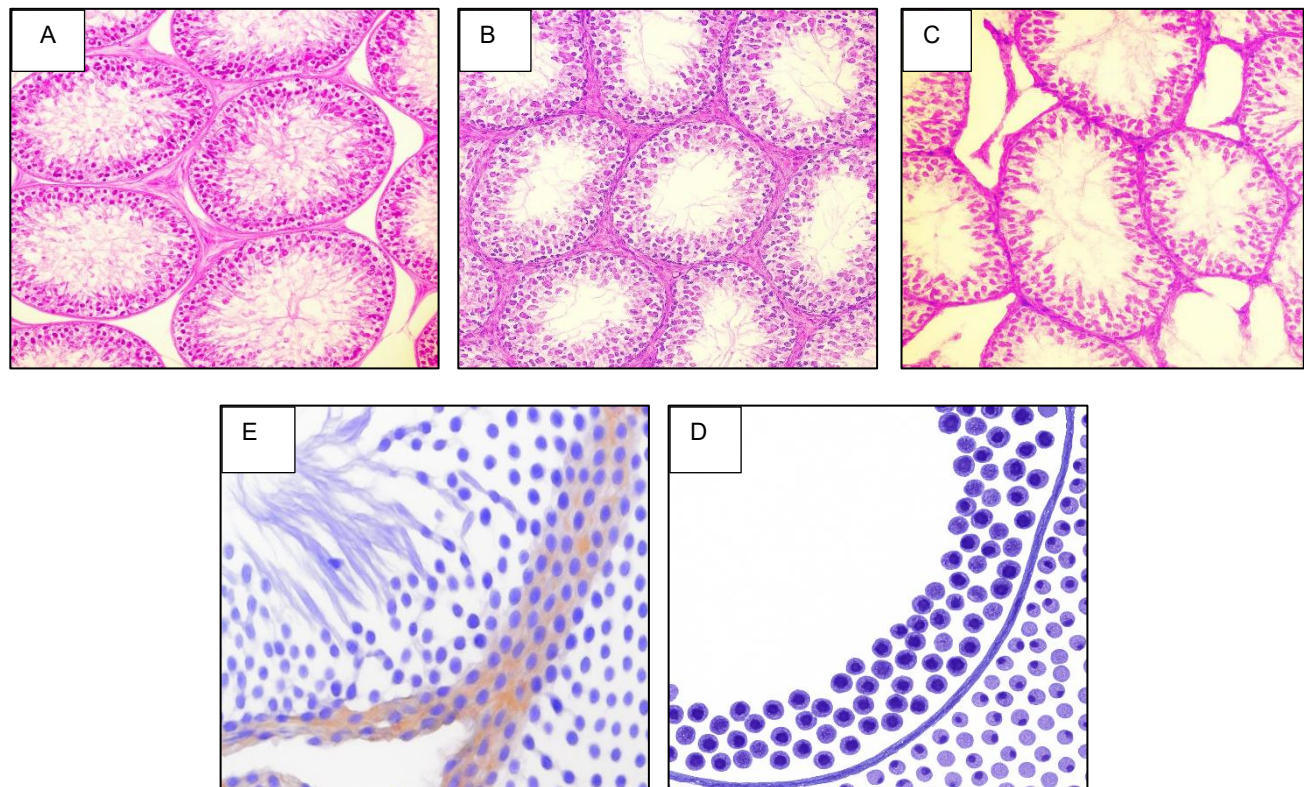


Fig. 3 Resultados Obtenido de los efectos histopatológicos y moleculares a la exposición de ELF-EMF de 50 Hz en los testículos de ratas durante diferentes periodos de tiempo. (Çetkin, Kızıllkan, & Demir, 2017).

M. Cetkin et al., (2017) realizaron un estudio para analizar los efectos de la exposición a ELF-EMF utilizando ratones. Los resultados se representan en un conjunto de imágenes en la Fig. 3. en la figura A se observaron una leve propagación de las células germinales de su distribución normal, hubo una reducción en el conteo y una maduración celular prematura de la espermatogénesis de estas células que fueron expuesta por un mes. A diferencia del grupo de la Fig. B que los efectos se intensificaron después de 2 meses exposición, en donde la distribución celular se observó más desordenada, se notó una reducción considerable de las células germinales. En el grupo de la Fig. C en donde

su tiempo de exposición fue de 3 meses se encontró con la desaparición de las células germinales en su mayoría, en donde se dificultó la detección espermatogénica junto con una reducción de las células de Leydig. Otros resultados arrojaron en el análisis inmunohistoquímico un nivel alto de la proteína proapoptótica bax en la exposición por 2 meses y está disminuyendo en el grupo de 3 meses (Fig. C). La manifestación de la proteína BCL-2 en el primer mes fue casi nula, en el segundo mes fue más fuerte y en el tercer mes se mostró más débil (ver fig. E). Los resultados muestran que las alteraciones fueron de manera exponencial en el equilibrio apoptótico de las células germinales, relacionado con el tiempo de exposición a la ELF-EMF (M. Cetkin et al., 2017). Li et al. (2018) encontraron en su investigación que la exposición de RF-EMF de 1800 MHz (SAR de 4 W/kg) arrojó que se produce la autofagia por medio de AMPK/mTOR y genera un daño en el ADN del espermatozoide del sujeto de estudio, en este caso un ratón. Este proceso está determinado de manera parcial por la melatonina, que evita la producción de ROS haciendo que la autofagia actúe como un protector contra el daño del ADN. Este resultado nos indica lo perjudicial que puede ser una exposición en estos parámetros.

Tabla V Resultados Obtenidos en los estudios analizados

Parámetros evaluados	Disminución (%)	Incremento (%)	Sin cambios (%)	Total, de estudios
Motilidad	66.7% (10/15)	6.7% (1/15)	26.6% (4/15)	15
Concentración	53.3% (8/15)	0% (0/15)	46.7% (7/15)	
Viabilidad	53.3% (8/15)	0% (0/15)	46.7% (7/15)	

Nota. Tabla por elaboración propia

En la Tabla V se observa el análisis comparativo de los resultados experimentales seleccionados. Este análisis de las partes afectada de la morfología del espermatozoide bajo diferentes tipos de condiciones experimentales. La cabeza del espermatozoide es la región más afectada, que resulta importante destacar por su papel en la fertilización. Los estudios *in vivo* que se realizaron en ratones muestran alteraciones muy generalizadas en diferentes regiones del espermatozoide, como las alteraciones del escroto, la producción y viabilidad dentro del mismo, Mostrando resultados más acercados a la exposición en condiciones reales. A diferencia de los estudios *in vivo* que

su estudio es más controlado dando resultados más precisos de las afectaciones al espermatozoide.

Fuente RF- EME	Tipo de estudio	Parámetros Seminales			Observaciones	Frecuencia	Tiempo de exposición	SAR (W/kg)
		Viabilidad	Concentración	Motilidad				
Teléfonos Móviles (2G, 3G)	<i>In vitro</i> (humano)	↓	↓	↓	Daño Mitocondrial.	900MHz	16 h continuas	1-3- 2.1
Teléfonos Móviles (GSM)	<i>In vitro</i> (humano)	↓	↓	X	Estrés oxidativo.	850- 1900MHz	1h/5 días	1.46
Teléfonos Móviles (4G)	<i>Animal, experimental</i>	↓	X	↓	Estrés oxidativo y apoptosis.	1800MHz	2h/día, 60 días	0.45
Teléfonos Móviles (GSM)	Animal, experimental	↓	X	X	Daño en las células germinales maduras.	900 MHz	2h/día, 30 días	0.2-2
Teléfonos Móviles (GSM)	<i>In vitro</i> (humano)	X	X	↓	Fragmentación del ADN (SDF) y disminución acrosoma.	900 MHz	1 h	-
Teléfonos Móviles (GMS)	<i>In vitro</i> (humano)	↓	↓	↓	Fragmentación del ADN (SDF) y apoptosis	900 MHz	1h	0.1 - 4
Teléfonos Móviles (GSM, 3G, 4G)	Humano, observacional	X	X	↓	Exposición Acumulativa	Uso diario	Crónico >1año	-
Teléfonos Móviles (5G)	<i>In vitro</i>	X	X	↑	Cambios en movilidad de esperma por	42 GHz	30min	0.2

Fuente RF-EME	Tipo de estudio	Parámetros Seminales			Observaciones	Frecuencia	Tiempo de exposición	SAR (W/kg)
		Viabilidad	Concentración	Motilidad				
Teléfonos móviles Y dispositivos inalámbricos	Revisión	↓	↓	↓	interacción superficial Deterioro en la motilidad progresiva y total de los espermatozoides Aumento de Ros mitocondriales y daño en el ADN espermático	900MHz - 2.4 GHz	Exposición crónica	0.1-2
Generador de RF-EME	Animal, experimental	↓	X	↓		905 MHz	12 horas	2.2
Sistema de guía de ondas cilíndrico ajustada a 1.8 ghz, simula la frecuencia de teléfonos móviles	<i>In vitro</i>	X	X	↓	Aumento de ROS en mitocondrias, daño oxidativo al ADN y fragmentación del ADN	1.8 GHz	16 h	0.4 - 27.5
Teléfonos móviles	<i>In vivo</i> (animales)	X	↓	X	Estrés oxidativo en células Leydig	850 - 1850 MHz	30min/día hasta 24 h/día x 20 días a 6 semanas	2

Fuente RF- EME	Tipo de estudio	Parámetros Seminales			Observaciones	Frecuencia	Tiempo de exposición	SAR (W/kg)
		Viabilidad	Concentración	Motilidad				
Teléfonos móviles	<i>In vivo</i> (humanos)	X	↓	X	Afectación del eje HPG	850 - 1850 MHz	4 semanas hasta 6 años de uso móvil	1.6
Dispositivo experimental de 900 MHz (Simula frecuencias telefónicas)	<i>In vivo</i> (animales)	↓	↓	↓	Aumento de anomalías morfológicas en espermatozoide	900 MHz	2h/día x 8 semanas	1.075
Teléfonos móviles (GSM)	<i>In vivo</i> (ratas Wistar)	X	↓	↓	Estrés oxidativo, disminución en peso y conteo espermáticos.	900 MHz	1h/día, 30 días	0.1- 1.5

Nota. Tabla construida a partir de los aportes de Iulius et al. (2009), Agarwal et al. (2008), Shahin et al. (2018), Vereschchaka et al. (2017), Zalata et al. (2015), Hassanzadeh-Taheri et al. (2022), Zhang et al. (2022), Volkova et al. (2014), Russell (2018), Houston et al. (2019), Agarwal et al. (2009), Maluin et al. (2021), Shahin et al. (2019) y Çetkin et al. (2017).

↓: DISMINUCION DEL PORCENTAJE X: SIN ALTERACIONES -: NO ESPECIFICADO

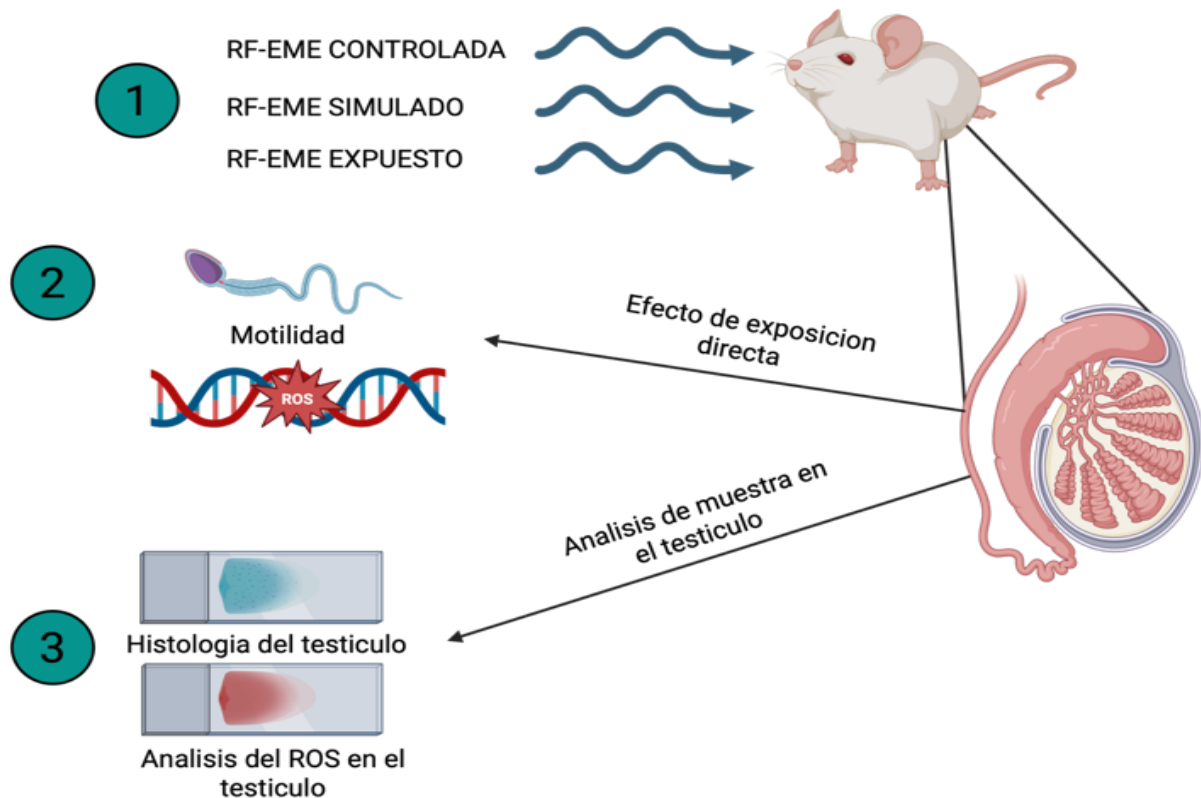


Fig. 4 Impacto de la exposición a RF-EME en la viabilidad y motilidad de los espermatozoides. (Assefa & Abdu, 2024).

En la Fig. 4, Houston et al. (2019). Utilizaron una máquina dedicada para la generación de RF-EME por 12 h al día a una frecuencia de 905 MHz, con un SAR específico de 2.2 W/Kg, a un periodo de 1 a 5 semanas. Los resultados obtenidos al observar los testículos del ratón no mostraron diferencia de la morfología entre los individuos que fueron utilizados en la exposición simulada a los de la no simulada. Para el análisis del ROS en los testículos producidos por la exposición la RF, se utilizó anticuerpo γ H2AX como un marcador de roturas de doble cadena, se obtuvo que no hubo daño significativo del ADN, puesto que los parámetros de γ H2AX se mantuvieron consistentes en todo el análisis. Sin embargo, al momento de analizar la exposición de la RF-EMR directamente en el espermatozoide, se observó un impacto en su viabilidad. En donde se observaron que los espermatozoides después de 5 semanas que estaban aislados por el epidídimo mostraron reducción de viabilidad y motilidad a causa de la exposición de la RF-EME. Además, al evaluar los niveles de ROS y afección del ADN directamente en el espermatozoide, utilizando una sonda fluorescente de dihidroetidio (DHE), en donde se

obtuvo un valor aproximado del 14% y 75% de muestras teñidas con esta sonda. no se encontró un daño significativo por ROS dentro de los testículos, a comparación con la exposición directa al espermatozoide si hubo un contraste con el ROS generado dentro de la mitocondria en donde las primeras 3 semanas de exposición si hubo daño significativo en la mitocondria, pero se observó que la 5 semana de exposición hubo una normalización en los niveles de ROS en la célula. Dando como resultado los daños leves ocasionados por estos tipos de exposiciones de un 5% a 6% en la fragmentación del ADN en las primeras 3 semanas. La evidencia analizada en esta revisión sugiere que la exposicion por los RF-EMR tiene efectos negativos a la motilidad espermática. El crecimiento exponencial de las tecnologías móviles y su posible relación con la infertilidad masculina ha captado la atención de la comunidad científica y medica (Miller et al., 2019). Las investigaciones realizadas son un reflejo de la importancia de comprender por qué son necesarios este tipo de estudios; sin embargo, al pasar el tiempo sigue creciendo la necesidad de comunicarnos constantemente para fines laborales o recreativos. El incremento de los dispositivos móviles lleva el desarrollo de otros recursos tecnológicos, como las antenas móviles, para garantizar la señal activa y una buena recepción (Egea-López et al., 2005). En los CEM de baja frecuencia (ELF-EMF) se pueden encontrar alteraciones histopatológicas progresivas en el tejido testicular y aumento en el ROS, pero hay que destacar que no tiene alteraciones significativas en la motilidad y la concentración del espermato (Assefa & Abdu, 2024). A comparación con estudios que las frecuencias de 900 MHz sí tienen consecuencias negativas en la fertilidad masculina, disminuyendo parámetros espermáticos, hormonales y la fisiología del testículo (Tas et al., 2013). Estos estudios dan énfasis a los efectos del ROS y la inflamación testicular como principales causantes de la infertilidad masculina por EMF. No obstante, dando una dosis de espermina se logró crear una capa protectora considerable para evitar daños, obteniendo una restauración moderada de la esteroidogenesis y la espermatogénesis, también reduciendo el ROS, la inflamación y daños en el ADN. Estos resultados potencian el uso de la espermina como un agente terapéutico a estas problemáticas de fertilidad asociadas a los EMF. Pero aun existiendo estos avances se requieren más estudios que avalen estos procedimientos y su aplicación en investigaciones clínicas.

Los hallazgos de este estudio muestran investigaciones previas que reportan efectos adversos de la RF-EMR en la fertilidad masculina. De Luliis et al. (2009) señala que la exposición a 1.8 GHz induce estrés oxidativo en espermatozoides humanos in vitro, disminuyendo la motilidad a un 54%, aumentando así la fragmentación del ADN un 29% [80]. Estos resultados coinciden con los de Shahin et al. (2018), donde fueron expuestas ratas a 900 MHz dando como resultado disminuciones similares en viabilidad de un 30% y concentración espermática de un 41% (Shahin et al., 2018). Respaldando el papel del daño mitocondrial como mecanismo compartido. Sin embargo, existen diferencias en los efectos sobre las hormonas gonadotrópicas, al igual que Shahin et al. el aumento observado en FSH 79% y LH 35.3% como respuesta a la caída de testosterona de 48.5% (Shahin et al., 2018). En Çetkin et al. (2017) no se detectaron cambios significativos, estas diferencias podrían atribuirse a variaciones en los protocolos experimentales, la tasa de absorción específica SAR: 1.075 W/kg vs. 0.4–2 W/kg o la duración de la exposición de 8 semanas vs 30 días (Çetkin et al., 2017). Además, Maluin et al. destacan en su revisión sistemática que los efectos hormonales se observan más en exposiciones crónicas mayor a 6 meses (Maluin et al., 2021). Por lo cual subraya la importancia de considerar el factor temporal al comparar estudios.

Los efectos experimentados se explican principalmente por tres vías. Primero, el estrés oxidativo, el cual se caracteriza por la generación de ROS y la disminución de enzimas antioxidantes como la glutatión peroxidasa y la catalasa (Shahin et al., 2019). Este desbalance oxidativo induce peroxidación lipídica, lo que provoca daños en las membranas celulares de los espermatozoides comprometiendo su funcionabilidad (De Luliis, Newey, King, & Aitken, 2009). Segundo, N. N. Shahin et al. (2019) mostró en su investigación la fragmentación del ADN del espermatozoide se pudo observar un aumento de la motilidad de un 6.6 veces con cola en ratas expuestas (Shahin et al., 2019). Esta investigación coincide con Agarwal et al (2008), quienes asociaron la radiación de móviles con un incremento del 40% en daño al ADN espermático en humanos (Agarwal et al., 2008). Tercero, la disfunción hormonal por alteración de la esteroidogénesis, evidenciada por la baja regulación de la proteína StAR y las enzimas 3β -HSD/ 17β -HSD (Shahin et al., 2019), mecanismo también descrito por Sepehrimanesh et al. en modelos animales (Sepehrimanesh et al., 2014). De los 15 estudios mostrados

en la TABLA VI, en un 26.67% se vio afectado directamente el flagelo por daños en su morfología y funcionalidad. En un 46.67% de los estudios el cuello tuvo daños en la mitocondria y 66.67% afectando en la zona de la cabeza por disminución del acrosoma, daños y fragmentación del ADN. La RF-EMR afecta directamente la morfología y funcionabilidad del flagelo espermático, provoca deformaciones estructurales en la cola reduciendo la motilidad progresiva del espermatozoide (Kesari et al., 2017). Al ser afectadas las mitocondrias, reduce la producción de ATP, genera exceso de ROS y compromete el suministro energético necesario para la movilidad espermática [99]. Los efectos en la zona de la cabeza del espermatozoide alteran su morfología, daña la membrana plasmática, afecta la integridad del acrosoma, induce estrés oxidativo y compromete su capacidad para fecundar el óvulo (Bhat, 2017). En la TABLA IV se realiza una comparación de los estudios experimentales seleccionados para este análisis, en donde se muestra cómo se impacta la morfología de los espermatozoides en diferentes condiciones. La cabeza del espermatozoide es la región más impactada sabiendo que esta es la parte más importante para la fertilización. Los estudios *in vivo* realizados en ratones crean alteraciones generalizadas, analizando que en este tipo de experimentos son los más semejantes a una exposición real. A diferencia de los *in vitro* de los que podemos tener resultados más específicos evaluando la cabeza y en menor proporción, el cuello y el flagelo.

Relevancias clínicas y consideraciones prácticas

Las implicaciones clínicas de estas investigaciones son bastante significativas, especialmente con el contexto del uso diario de teléfonos móviles. Tal cual como advierte Aitken et al en su investigación, el daño acumulativo al ADN espermático podría contribuir al aumento de infertilidad idiopática y riesgos transgeneracionales, como abortos recurrentes o trastornos del desarrollo embrionario (Aitken et al., 2009). Para mitigar estos riesgos se recomienda: evitar guardar los teléfonos móviles cerca de los testículos, como en los bolsillos delanteros del pantalón (Bhat, 2017). Shahin et al, demostró que la administración de espermina revirtió el daño oxidativo y a su vez mejoró los parámetros espermáticos en ratas (N. N. Shahin et al. 2019). Además, Maluin et al. (2021) sugieren reevaluar los límites de SAR para dispositivos móviles, especialmente en poblaciones vulnerables, como adolescentes (Maluin et al., 2021).

Retos y oportunidades

Las actuales investigaciones en efectos de RF-EMR en la motilidad espermática enfrentan importantes retos, como la falta de estandarización en los protocolos experimentales con variaciones en SAR, frecuencias y tiempos de exposición. Se encuentran diferentes dificultades para replicar condiciones reales de uso de dispositivos móviles y la escasa evidencia sobre el impacto de nuevas tecnologías como el 5G. Además, los mecanismos biofísicos subyacentes no están del todo claro, particularmente a la generación de estrés oxidativo y daño mitocondrial. Sin embargo, estas limitaciones abren oportunidades para desarrollar protocolos estandarizados basados en guías internacionales, implementar modelos experimentales avanzados como lo son sistemas microfluídicos y cultivos 3D. Realizar estudios epidemiológicos longitudinales con monitoreo preciso de exposición, explorar terapias antioxidantes específicas y emplear algoritmos inteligentes para el análisis de datos masivos o macrodatos. Superar estos desafíos mediante enfoques multidisciplinarios permitirá establecer umbrales de seguridad más precisos y desarrollar estrategias efectivas para proteger la salud reproductiva masculina en un mundo que cada vez utiliza más teléfonos móviles.

CONCLUSIONES

La revisión de los estudios seleccionados y los datos arrojados por la exposición de las RF-EMF pueden tener un efecto adverso a la motilidad espermática. También afectan otros factores, como el conteo espermático, daño al ADN, alteraciones hormonales y enzimas tóxicas. A estos efectos se le pueden atribuir la infertilidad del hombre, ya que las células, por una exposición prolongada a estas ondas, pueden generar ROS. Pero el camino de estas investigaciones aún es extenso, ya que debemos tener en cuenta otros factores como la obesidad, tabaquismo, entre otros. Son necesarios más estudios experimentales utilizando diferentes técnicas y tipos, ya sea in vivo e in vitro, para tener evidencia actualizada y con mayores datos de los posibles efectos por los CEM. Cada estudio arrojó diferentes datos en donde son similares entre sí y podemos destacar sus ventajas y desventajas.

La motilidad espermática es uno de los factores importantes para la fertilización, como se pudo exponer en este artículo. Al ver los resultados de los estudios analizados, podemos determinar que la motilidad sí se ve afecta por la emisión de RF-EMR de los teléfonos móviles en diferentes frecuencia específicas, pero recalando que esto se determina por el tiempo de exposición; es decir, se deben realizar análisis y estudios experimentales analizando la posición del dispositivo móvil en los bolsillos del pantalón y su cercanía a los testículos, para tener datos más reales y cercanos al uso diario de estos dispositivos. Esto nos llevará a analizar las posibles soluciones y crear estándares de uso para reducir los problemas de infertilidad producidos por los dispositivos móviles. En los estudios seleccionados presentan un análisis muy concreto del impacto de la RF-EME en la fertilidad de los ratones, tomando en cuenta los efectos claves como la capacidad de los espermatozoides para que se efectúe la reacción acrosómica, la unión de la zona pelúcida y la fertilización del ovulo. Mientras mayor es el tiempo de exposición de las RF-EME, más se puede afectar la concentración y calidad del espermato, incluso el desarrollo del embrión. Los resultados de los estudios arrojaron una disminución en la tasa de fertilización y desarrollo de los blastocitos en comparación con los estudios de control. Además, estos estudios experimentales de análisis riguroso nos dan un punto de partida para los riesgos del uso de los teléfonos móviles y cómo estos están ligados con la infertilidad del hombre.

Es importante tener en cuenta la progresión exponencial que se tiene en la tecnología sobre todo en los últimos 20 años. Esto ha implicado evoluciones considerables en la transmisión de datos y comunicación por medio de antenas para la operación de los teléfonos móviles, generando efectos del CEM en la salud reproductiva masculina. Comprender mejor el impacto del RF-EME, permitirá plantear medidas para prevenir los efectos que puede causar en la motilidad espermática. De esta manera se podrán ofrecer recomendaciones que contribuyan a proteger la salud reproductiva en los hombres. Según lo expuesto en este artículo, en siguientes estudios se podrían estandarizar diseños experimentales controlando las variables para así realizar mejores comparativas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agarwal, A., & Said, S. A. (2005). Oxidative stress, DNA damage and apoptosis in male infertility: A clinical approach. *BJU International*, 95(4), 503–507. <https://doi.org/10.1111/j.1464-410X.2005.05328.x>
- Agarwal, A., Deepinder, F., Sharma, K. P., Ranga, G., & Li, J. (2008). Effect of cell phone usage on semen analysis in men attending infertility clinic: An observational study. *Fertility and Sterility*, 89(1), 124–128. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2007.01.166>
- Agarwal, A., Desai, N. R., Makker, K., Varghese, A., Mouradi, R., Sabanegh, E., & Sharma, R. (2009). Effects of radiofrequency electromagnetic waves (RF-EMW) from cellular phones on human ejaculated semen: An in vitro pilot study. *Fertility and Sterility*, 92(4), 1318–1325. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2008.08.022>
- Agarwal, A., Gupta, S., & Sharma, R. (2005). Role of oxidative stress in female reproduction. *Reproductive Biology and Endocrinology*, 3(1), 28. <https://doi.org/10.1186/1477-7827-3-28>
- Agarwal, A., Sharma, R., Harlev, A., & Esteves, S. (2016). Effect of varicocele on semen characteristics according to the new 2010 World Health Organization criteria: A systematic review and meta-analysis. *Asian Journal of Andrology*, 18(2), 163–170. <https://doi.org/10.4103/1008-682X.172638>
- Agarwal, A., Singh, A., Hamada, A., & Kesari, K. (2011). Cell phones and male infertility: A review of recent innovations in technology and consequences. *International Brazilian Journal of Urology*, 37(4), 432–454.
- Aitken, R. J. (1999). The human spermatozoon – a cell in crisis? *Journal of Reproduction and Fertility*, 115(1), 1–7. <https://doi.org/10.1530/jrf.0.1150001>
- Aitken, R. J. (2006). Sperm function tests and fertility. *International Journal of Andrology*, 29(1), 69–75. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2605.2005.00630.x>

- Aitken, R. J., Drevet, J. S., Moazamian, A., & Gharagozloo, P. (2022). Male infertility and oxidative stress: A focus on the underlying mechanisms. *Antioxidants*, 11(2), 306. <https://doi.org/10.3390/antiox11020306>
- Aitken, R. J., Finnie, J. M., Muscio, L., & Whiting, S. (2014). Potential importance of transition metals in the induction of DNA damage by radiofrequency electromagnetic fields. *Journal of Cellular Physiology*, 229(4), 455–462. <https://doi.org/10.1002/jcp.24461>
- Al-Abdulrazzaq, D., Al-Temaimi, R., Al-Kandari, N., & Al-Shammari, F. (2020). Effects of 5G radiation on human sperm motility: An in vitro study. *Journal of Assisted Reproduction and Genetics*, 37(8), 1853–1860. <https://doi.org/10.1007/s10815-020-01862-y>
- Alchalabi, A. A. R., Ali, S. H. M., & Malik, N. A. (2020). Specific absorption rate analysis in human male reproductive organs due to mobile phone radiation at 900 MHz and 1800 MHz. *IEEE Access*, 8, 224417–224428. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3044563>
- Amaral, A. (2022). Energy metabolism in mammalian sperm motility. *WIREs Mechanisms of Disease*, 14(5), e1569. <https://doi.org/10.1002/wsbm.1569>
- Assefa, E. M., & Abdu, S. M. (2024). Histopathologic effects of mobile phone radiation exposure on the testes and sperm parameters: A systematic literature review of animal studies. *Frontiers in Reproductive Health*, 6, 1515166. <https://doi.org/10.3389/frph.2024.1515166>
- Aydin, M., Turk, G., Yuksel, M., Cevik, A., Apaydin, A. M., & Yilmaz, S. (2007). Effect of electromagnetic fields on the sperm characteristics and histopathology status of testis in rats. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 26(3), 177–186.
- Bhat, M. A. (2013). Effects of electromagnetic waves emitted by mobile phones on male fertility. *Computer Engineering and Intelligent Systems*, 4(3), 51–64.

- Bhat, M. A. (2017). Effects on testis of human being with specific absorption rate (SAR) of mobile phone. *Scholars Journal of Engineering and Technology*, 5, 599–601.
- Blank, M., & Goodman, R. (1999). Electromagnetic fields may act directly on DNA. *Journal of Cellular Biochemistry*, 75(3), 369–374.
- Cadenas, E., & Davies, K. J. A. (2000). Mitochondrial free radical generation, oxidative stress, and aging. *Free Radical Biology and Medicine*, 29(3–4), 222–230. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(00\)00317-8](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(00)00317-8)
- Cetkin, M., Kizilkan, H., & Demir, R. (2017). Quantitative changes in testicular structure and function in rat exposed to mobile phone radiation. *Andrologia*, 49(1), e12761.
- Cheng, Y. M., Hu, X. N., Peng, Z., Pan, T. T., Wang, F., Chen, H. Y., Chen, W. Q., Zhang, Y., Zeng, X. H., & Luo, T. (2022). Lysine glutarylation in human sperm is associated with progressive motility. *Human Reproduction*,
- Chougule, A., & Joan, M. (2025). Ionizing radiation and reproductive health. *Journal of Reproductive Healthcare and Medicine*.
- Christ, A., Kuster, N., Samaras, T., Goiceanu, C., & Bahr, A. (2006). The dependence of electromagnetic far-field absorption on body tissue composition in the frequency range from 300 MHz to 6 GHz. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 54(5), 2188–2195. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2006.872789>
- Comar, V. A., Petersen, C. G., Mauri, A. L., Mattila, M., Vagnini, L. D., Renzi, A., ... & Esteves, S. C. (2017). Influence of the abstinence period on human sperm quality: Analysis of 2,458 semen samples. *JBRA Assisted Reproduction*, 21(4), 306–312. <https://doi.org/10.5935/1518-0557.20170052>
- Cordelli, E., Ardoino, L., Benassi, B., Consales, C., Eleuteri, P., Marino, C., ... & Pacchierotti, F. (2024). Effects of radiofrequency electromagnetic field (RF-

- EMF) exposure on male fertility: A systematic review of experimental studies on non-human mammals and human sperm in vitro. *Environment International*, 185, 108509.
- Dcunha, R., Hussein, R. S., Ananda, H., Kumari, S., Adiga, S. K., Kannan, N., Zhao, Y., & Kalthur, G. (2022). Current insights and latest updates in sperm motility and associated applications in assisted reproduction. *Reproductive Sciences*, 29(1), 7–25. <https://doi.org/10.1007/s43032-020-00408-y>
- De Iuliis, G. N., Newey, R. J., King, B. V., & Aitken, R. J. (2009). Mobile phone radiation induces reactive oxygen species production and DNA damage in human spermatozoa in vitro. *PLoS ONE*, 4(7), e6446. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006446>
- De Iuliis, G. N., Thomson, L. K., Mitchell, L. A., Finnie, J. M., Koppers, A. J., Hedges, A., Nixon, B., & Aitken, R. J. (2009). DNA damage in human spermatozoa is highly correlated with the efficiency of chromatin remodeling and the formation of 8-hydroxy-2'-deoxyguanosine, a marker of oxidative stress. *Biology of Reproduction*, 81(3), 517–524. <https://doi.org/10.1095/biolreprod.109.076836>
- Durairajanayagam, D. (2018). Lifestyle causes of male infertility. *Arab Journal of Urology*, 16(1), 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.aju.2017.12.004>
- Dutta, S., Majzoub, A., & Agarwal, A. (2019). Oxidative stress and sperm function: A systematic review on evaluation and management. *Arab Journal of Urology*, 17(2), 87–97. <https://doi.org/10.1080/2090598X.2019.1599624>
- Egea-López, E., Martinez-Sala, A., Vales-Alonso, J., García-Haro, J., & Malgosa-Sanahuja, J. (2005). Wireless communications deployment in industry: A review of issues, options and technologies. *Computers in Industry*, 56(1), 29–53. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2004.10.001>
- Eisenberg, M. L., Kim, S., Chen, Z., Sundaram, R., Schisterman, E. F., & Buck Louis, G. M. (2014). The relationship between male BMI and waist circumference

- on semen quality: Data from the LIFE study. *Human Reproduction*, 29(2), 193–200. <https://doi.org/10.1093/humrep/det428>
- Eren, L. B., Dasdag, S., Akdag, M. Z., & Tas, M. (2015). Effects of chronic exposure to 900 MHz radiofrequency radiation on testicular histology in rats. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 29(5), 911–917. <https://doi.org/10.1080/13102818.2015.1053439>
- Fagbohun, O. O. (2014). Comparative studies on 3G, 4G and 5G wireless technology. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*, 9(3), 7.
- Falzone, N., Huyser, C., & Franken, D. R. (2010). Mobile phone radiation does not induce pro-apoptosis effects in human spermatozoa. *Radiation Research*, 174(2), 169–176. <https://doi.org/10.1667/RR2091.1>
- Federal Communications Commission (FCC). (1997). OET Bulletin 65: Evaluating compliance with FCC guidelines for human exposure to radiofrequency electromagnetic fields.
- Franken, D. R., & Oehninger, S. (2012). Semen analysis and sperm function testing. *Asian Journal of Andrology*, 14(1), 6–13. <https://doi.org/10.1038/aja.2011.58>
- Gaffney, E. A., Gadélha, H., Smith, D. J., Blake, J. R., & Kirkman-Brown, J. C. (2011). Mammalian sperm motility: Observation and theory. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 43, 501–528. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121108-145442>
- Gautam, R., Priyadarshini, E., Nirala, J., & Rajamani, P. (2021). Impact of nonionizing electromagnetic radiation on male infertility: An assessment of the mechanism and consequences. *International Journal of Radiation Biology*, 98(6), 1063–1073. <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1859154>
- Gavriliouk, D., & Aitken, R. J. (2015). Damage to sperm DNA mediated by reactive oxygen species. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 868, 23–45. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18881-2_2

- Gorpinchenko, A., Nikitin, O., Banyra, O., & Shulyak, A. (2014). The influence of direct mobile phone radiation on sperm quality. *Central European Journal of Urology*, 67(1), 65–71.
- Gorpinchenko, I., Nikitin, O., Banyra, O., & Shulyak, A. (2014). The influence of direct mobile phone radiation on sperm quality. *Central European Journal of Urology*, 67(1), 65–71. <https://doi.org/10.5173/ceju.2014.01.art14>
- Gorski, R., Kotwicka, M., Skibinska, I., Jendraszak, M., & Wosinski, S. (2020). Effect of low-frequency electric field screening on motility of human sperm. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 27(3), 427–434. <https://doi.org/10.26444/aaem/116019>
- Habash, R. (2007). *Bioeffects and therapeutic applications of electromagnetic energy*. CRC Press.
- Hassanzadeh-Taheri, M., Khalili, M. A., Hosseini Mohebati, A., et al. (2022). The detrimental effect of cell phone radiation on sperm biological characteristics in normozoospermic. *Andrologia*, 54(1), e14257. <https://doi.org/10.1111/and.14257>
- Henkel, R. R., & Schill, W. B. (2003). Sperm preparation for ART. *Reproductive Biology and Endocrinology*, 1, 108. <https://doi.org/10.1186/1477-7827-1-108>
- Houston, B. J., Nixon, B., King, B. V., De Iuliis, G. N., & Aitken, R. J. (2019). Whole-body exposures to radiofrequency-electromagnetic energy can cause DNA damage in mouse spermatozoa via an oxidative mechanism. *Scientific Reports*, 9(1), 17478. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53983-9>
- Houston, B. J., Nixon, B., King, B. Y., De Iuliis, G. N., & Aitken, R. J. (2016). The effects of radiofrequency electromagnetic radiation on sperm function. *Reproduction*, 152(6), R263–R276. <https://doi.org/10.1530/REP-16-0126>

International Agency for Research on Cancer (IARC). (2002). *Non-ionizing radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields* (IARC Monographs, Vol. 80).

International Atomic Energy Agency. (1996). Safety Standards.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2020). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics*, 118(5), 483–524. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210>

Jodar, E., Selvaraju, T., Sandler, P., Diamond, M., Krawetz, W., & Kimmins, S. P. (2013). Stability, delivery and functions of human sperm RNAs at fertilization. *Nucleic Acids Research*, 41(7), 4104–4117. <https://doi.org/10.1093/nar/gkt132>

Kaur, P., Rai, U., & Singh, R. (2023). Genotoxic risks to male reproductive health from radiofrequency radiation. *Cells*, 12(4), 594. <https://doi.org/10.3390/cells12040594>

Kenny, R. P. W., Johnson, E., Adesanya, A. M., Richmond, C., Beyer, F., Calderon, C., ... & Pearson, F. (2024). The effects of radiofrequency exposure on male fertility: A systematic review of human observational studies with dose-response meta-analysis. *Environment International*, 190, 108817. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108817>

Kesari, K. K., & Behari, J. (2010). Effects of microwave at 2.45 GHz radiations on reproductive system of male rats. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 92(6), 1135–1147. <https://doi.org/10.1080/02772240903233637>

Kesari, K. K., Agarwal, A., & Henkel, R. (2018). Radiations and male fertility. *Reproductive Biology and Endocrinology*, 16(1), 118. <https://doi.org/10.1186/s12958-018-0431-1>

Kesari, K. K., Kumar, S., & Behari, J. (2012). Mobile phone usage and male infertility in Wistar rats. *Indian Journal of Experimental Biology*, 50(6), 464–470.

- Kesari, K. K., Kumar, S., Nirala, J., Siddiqui, M. H., & Behari, J. (2013). Biophysical evaluation of radiofrequency electromagnetic field effects on male reproductive pattern. *Cell Biochemistry and Biophysics*, 65(1), 85–96.
- Kivrak, E., Yurt, K., Kaplan, A., Alkan, I., & Altun, G. (2017). Effects of electromagnetic fields exposure on the antioxidant defense system. *Journal of Microscopy and Ultrastructure*, 5(4), 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.jmau.2017.07.003>
- Koohestanidehaghi, Y., Khalili, M. A., Dehghanpour, F., & Seify, M. (2024). Detrimental impact of cell phone radiation on sperm DNA integrity. *Clinical and Experimental Reproductive Medicine*, 51(1), 13–19. <https://doi.org/10.5653/cerm.2023.06121>
- Koppers, A. J., De Iuliis, G. N., Finnie, J. M., McLaughlin, E. A., & Aitken, R. J. (2008). Significance of mitochondrial reactive oxygen species in the generation of oxidative stress in spermatozoa. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 93(8), 3199–3207. <https://doi.org/10.1210/jc.2007-2616>
- Kowalczyk, C. I., Saunders, R. D., & Stapleton, H. R. (1983). Sperm count and sperm abnormality in male mice after exposure to 2.45 GHz microwave radiation. *Mutation Research*, 122, 155–161.
- Krausz, C., & Riera-Escamilla, A. (2018). Genetics of male infertility. *Nature Reviews Urology*, 15, 369–384. <https://doi.org/10.1038/s41585-018-0003-3>
- Kumar, N., & Singh, A. K. (2015). Trends of male factor infertility, an important cause of infertility: A review of literature. *Journal of Human Reproductive Sciences*, 8(3), 191–196. <https://doi.org/10.4103/0974-1208.170370>
- Lai, H., & Singh, N. P. (1997). Acute exposure to a 60 Hz magnetic field increases DNA strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics*, 18(2), 156–165. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-186X\(1997\)18:2<156::AID-BEM8>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(1997)18:2<156::AID-BEM8>3.0.CO;2-1)

- Leigh, M. W., Pittman, J. E., Carson, J. L., Ferkol, T. W., Dell, S. D., Davis, S. D., et al. (2009). Clinical and genetic aspects of primary ciliary dyskinesia/Kartagener syndrome. *Genetics in Medicine*,
- Levitt, B., Lai, H., & Manville, A. (2022). Effects of non-ionizing electromagnetic fields on flora and fauna, part 1. Rising ambient EMF levels in the environment. *Reviews on Environmental Health*, 37(1), 81–122. <https://doi.org/10.1515/reveh-2021-0026>
- Li, R., Ma, M., Li, L., Zhao, L., Zhang, T., Gao, X., ... & Wang, M. (2018). The protective effect of autophagy on DNA damage in mouse spermatocyte-derived cells exposed to 1800 MHz radiofrequency electromagnetic fields. *Cellular Physiology and Biochemistry*, 48(1), 29–41. <https://doi.org/10.1159/000491660>
- Li, X., Fang, P., Mai, J., Choi, E. T., Wang, H., & Yang, X. F. (2013). Targeting mitochondrial reactive oxygen species as novel therapy for inflammatory diseases and cancers. *Journal of Hematology & Oncology*, 6, 19. <https://doi.org/10.1186/1756-8722-6-19>
- Liu, K., Li, Y., Zhang, X., Zhang, L., Wang, Y., Yu, X., ... & Zhou, P. (2014). Association between mobile phone use and semen quality: A systematic review and meta-analysis. *Andrology*, 2(4), 491–501. <https://doi.org/10.1111/j.2047-2927.2014.00205.x>
- Madamanchi, N. R., & Runge, M. S. (2007). Mitochondrial dysfunction in atherosclerosis. *Circulation Research*, 100(4), 460–473. <https://doi.org/10.1161/01.RES.0000258450.44413.96>
- Magalhaes, J. A., Ribeiro, L. S., Rego, J. P. A., & Andrade, C. R. (2021). Current markers for infertility in men. *JBRA Assisted Reproduction*, 25(4), 592–600. <https://doi.org/10.5935/1518-0557.20210013>

- Maluin, S. M., Osman, K., Jaffar, F. H. F., & Ibrahim, S. F. (2021). Effect of radiation emitted by wireless devices on male reproductive hormones: A systematic review. *Frontiers in Physiology*, 12, 732420. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.732420>
- Miller, A. B., Sears, M. E., Morgan, L. L., Davis, D. L., Hardell, L., Oremus, M., & Soskolne, C. L. (2019). Risks to health and well-being from radio-frequency radiation emitted by cell phones and other wireless devices. *Frontiers in Public Health*, 7, 223. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2019.00223>
- Momeni, H. R., Abnosi, M. H., & Eskandari, N. (2020). Quantitative evaluation of human sperm viability using MTT assay: A laboratory study. *International Journal of Reproductive Biomedicine*, 18(11), 983–988. <https://doi.org/10.18502/ijrm.v13i11.7966>
- Morielli, T., & O'Flaherty, C. (2015). Oxidative stress impairs function and increases redox protein modifications in human spermatozoa. *Reproduction*, 149(1), 113–123. <https://doi.org/10.1530/REP-14-0240>
- Murphy, M. P. (2009). How mitochondria produce reactive oxygen species. *Biochemical Journal*, 417(1), 1–13. <https://doi.org/10.1042/BJ20081386>
- Nyberg, N. R., Hardell, L., de Salles, P. H. N., Davis, D. L., & Pall, A. F. (2023). The European Union prioritises economics over health in the rollout of radiofrequency technologies. *Reviews on Environmental Health*, 38(1), 163–177. <https://doi.org/10.1515/reveh-2022-0106>
- Pacchierotti, F., Cordelli, E., Eleuteri, P., & Consales, C. (2021). Effects of radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure on male fertility and pregnancy and birth outcomes: Protocols for a systematic review of experimental studies in non-human mammals and in human sperm exposed in vitro. *Environment International*, 157, 106806. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106806>

- Repacholi, M. H. (1998). Low-level exposure to radiofrequency electromagnetic fields: Health effects and research needs. *Bioelectromagnetics*, 19(1), 1–19.
- Ricci, E., Al Beitawi, S., Cipriani, S., Candiani, M., Chiaffarino, F., Vigano, P., ... & Parazzini, F. (2017). Semen quality and alcohol intake: A systematic review and meta-analysis. *Reproductive Biomedicine Online*, 34(1), 38–47. <https://doi.org/10.1016/j.rbmo.2016.09.012>
- Russell, C. L. (2018). 5G wireless telecommunications expansion: Public health and environmental implications. *Environmental Research*, 165, 484–495. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.016>
- Saacke, R. G. (2008). Sperm morphology: Its relevance to compensable and uncompensable traits in semen. *Theriogenology*, 70(3), 473–478. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2008.04.012>
- Salama, G. R. (2008). Effects of exposure to electromagnetic fields on male reproduction. *Reviews on Environmental Health*, 23(4), 263–272.
- Sciorio, R., Tramontano, L., & Esteves, S. C. (2022). Effects of mobile phone radiofrequency radiation on sperm quality. *Zygote*, 30(2), 159–168. <https://doi.org/10.1017/S096719942100037X>
- Selvi Rani, D., Vanniarajan, A., Gupta, N. J., Chakravarty, B., Singh, L., & Thangaraj, K. (2006). A novel missense mutation C11994T in the mitochondrial ND4 gene as a cause of low sperm motility in the Indian subcontinent. *Fertility and Sterility*, 86(6), 1783–1785. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2006.04.044>
- Sepehrimanesh, M., Saeb, M. H., Nazifi, S., Kazemi, H. R., & Mortazavi, S. M. J. (2014). Impact of 900 MHz electromagnetic field exposure on main male reproductive hormone levels. *International Journal of Biometeorology*, 58(6), 1657–1663. <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0771-7>
- Shahin, N. N., Abdelkader, S. M., & Elhady, M. A. (2019). The protective role of spermine against male reproductive aberrations induced by exposure to

- electromagnetic field. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 370, 117–130.
<https://doi.org/10.1016/j.taap.2019.03.009>
- Shahin, S., Singh, S. P., & Chaturvedi, C. M. (2018). 1800 MHz mobile phone irradiation induced oxidative and nitrosative stress leads to p53 dependent Bax mediated testicular apoptosis in mice, *Mus musculus*. *Journal of Cellular Physiology*, 233(9), 7253–7267. <https://doi.org/10.1002/jcp.26558>
- Singh, R., Nath, R., Mathur, A. K., & Sharma, R. S. (2018). Effect of radiofrequency radiation on reproductive health. *Indian Journal of Medical Research*, 148(Suppl.), S92–S99. https://doi.org/10.4103/ijmr.IJMR_1056_18
- Stephens, S. M., Arnett, D. M., & Meacham, R. B. (2013). The use of in vitro fertilization in the management of male infertility: What the urologist needs to know. *Reviews in Urology*, 15(4), 154–160.
- Stüber, G. L. (2017). *Principles of mobile communication* (4th ed.). Springer International Publishing.
- Sun, Y., Dai, C., & Zhang, Z. (2018). Automated noninvasive sperm motility and morphology analysis and selection of sperm with high DNA integrity. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 37(6), 1342–1351.
- Taha, E. A., Ez-Aldin, A. M., Sayed, S. K., Ghandour, N. M., & Mostafa, T. (2012). Effect of smoking on sperm vitality, DNA integrity, seminal oxidative stress, zinc in fertile men. *Urology*, 80(5), 822–825.
<https://doi.org/10.1016/j.urology.2012.07.002>
- Tas, M., Dasdag, S., Akdag, M. Z., Cirit, U., Yegin, K., Seker, U., & Eren, L. B. (2013). Long-term effects of 900 MHz radiofrequency radiation emitted from mobile phone on testicular tissue and epididymal semen quality. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 33(3), 216–222.
<https://doi.org/10.3109/15368378.2013.801850>

- Vereschchaka, A. I., Glukhov, V. N., Berdinskikh, E. A., & Kudriavtsev, D. A. (2017). Influence of electromagnetic radiation of a mobile phone on the state of murine male germ cells. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 163, 280–282.
- Volkova, I., Mishra, A., Singh, S., & Chaturvedi, A. (2014). Effects of 42.25 GHz millimeter-wave irradiation on motility and chromatin status of human cryopreserved spermatozoa. *International Journal of Molecular Sciences*, 15(12), 23222–23236.
- Wahab, M. A., Podd, J. V., Rapley, B. I., & Rowland, R. E. (2007). Elevated sister chromatid exchange frequencies in dividing human peripheral blood lymphocytes exposed to 50 Hz magnetic fields. *Bioelectromagnetics*, 28(4), 281–288. <https://doi.org/10.1002/bem.20289>
- Wdowiak, A., Wdowiak, L., & Wiktor, H. (2019). Effect of ionizing radiation on the male reproductive system. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 26(...). World Health Organization. (2025). Infertilidad. https://www.who.int/es/health-topics/infertility#tab=tab_1
- Yu, G., Bai, Z., Song, C., Cheng, Q., Wang, G., Tang, Z., & Yang, S. (2021). Current progress on the effect of mobile phone radiation on sperm quality: An updated systematic review and meta-analysis of human and animal studies. *Environmental Pollution*, 282, 116952. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116952>
- Zalata, A., El-Samanoudy, A. Z., Shaalan, D., ... (2015). In vitro effect of cell phone radiation on motility, DNA fragmentation and clusterin gene expression in human sperm. *International Journal of Fertility and Sterility*, 9(1), 129–136. <https://doi.org/10.22074/ijfs.2015.4217>
- Zhang, Z., Li, J., Yang, L., Chen, X., & Wang, H. (2022). The association between mobile phone use and semen quality: A cross-sectional study. *Environmental Pollution*, 305, 119225. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119225>

ANEXO

Impacto de la exposición a campos electromagnéticos por las antenas de los teléfonos móviles en la motilidad espermática

Impact of exposure to electromagnetic fields through mobile phone antennas on sperm motility

Jendall Antonio Barria Quiñones
Ingeniería Biomédica
Universidad Latina de Panamá
Panamá, Panamá
jabarria@ulatina.edu.pa
0009-0008-7063-3985

Miguel Ángel Serrano Velarde
Ingeniería Biomédica
Universidad Latina de Panamá
Panamá, Panamá
Miserrano@est.ulatina.edu.pa
0009-0007-4167-3171

Seidy Victoria Gordon Vergara
Ingeniería Biomédica
Universidad Latina de Panamá
Panamá, Panamá
Segordon@ulatina.edu.pa
0009-0003-4081-237X

Ernesto Antonio Ibarra Ramírez
Ingeniería Biomédica
Universidad Latina de Panamá
Panamá, Panamá
ernestoibarra@est.ulatina.edu.pa
0000-0002-2028-0797

Resumen — Este estudio examina los efectos negativos de los campos electromagnéticos (CEM) en la motilidad espermática, centrándose en su impacto fisiológico. Se realizó una revisión sistemática seleccionando documentos relevantes de bases de datos científicos en revistas como Pubmed, Google Scholar, IEEE Xplore y Scielo. Aplicando criterios rigurosos de inclusión y exclusión. Según los estudios analizados, la exposición a CEM, incluyendo la radiación electromagnética de radiofrecuencia (RF-EMR), perjudica la motilidad espermática al inducir estrés oxidativo mitocondrial, lo que reduce la producción de ATP y altera la calidad del espermatozoide. Este fenómeno sigue un mecanismo clave detrás del deterioro de la fertilidad masculina relacionado con los CEM. Este artículo busca profundizar en los mecanismos para entender mejor cómo afectan a la reproducción. Los hallazgos resaltan la necesidad de más estudios para medir y evaluar riesgos.

Palabras Clave— Radiación electromagnética, motilidad espermática, hiperactivación, fertilidad masculina.

Abstract— This study examines the negative effects of electromagnetic fields (EMF) on sperm motility, focusing on their physiological impact. A systematic review was performed by selecting relevant papers from scientific databases in journals such as PubMed, Google Scholar, IEEE Xplore and Scielo. Rigorous inclusion and exclusion criteria were applied. According to the studies analyzed, EMF exposure, including radiofrequency electromagnetic radiation (RF-EMR), impairs sperm motility by inducing mitochondrial oxidative stress, which reduces ATP production and alters sperm quality. This phenomenon follows a key mechanism behind EMR-related impairment of male fertility. This article seeks to delve deeper into the mechanisms to better understand how they affect reproduction. The findings highlight the need for further studies to measure and assess risks.

Keywords—Electromagnetic radiation, sperm motility, hyperactivation, male fertility.

II. INTRODUCCIÓN

La infertilidad es definida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como la incapacidad de lograr un embarazo, luego de 12 meses de mantener relaciones sexuales sin protección [1]. A nivel mundial entre el 8-12 % de las parejas en edad fértil padecen de problemas de fertilidad [2]. En donde un promedio del 20-30% de los problemas de fertilidad son atribuibles al hombre, pudiendo llegar hasta un 50 % [2]. En este contexto, el hombre juega un papel vital en la fertilidad, pero diferentes factores pueden alterar la producción y buen rendimiento de los espermatozoides [3]. Entre ellos se encuentran la edad [4], genética [5], obesidad [6], tabaquismo [7], consumo de alcohol [8] y la exposición a la radiación electromagnética de radiofrecuencia (RF-EMR) [9].

El rápido desarrollo de las tecnologías de comunicación con antenas ha generado preocupación sobre los posibles efectos de los campos electromagnéticos (CEM) en la salud reproductiva masculina [10]. Mediante la viabilidad de mecanismos térmicos y no térmicos, se ha evaluado el impacto de los CEM en la capacidad de los espermatozoides de mantener su funcionalidad óptima y en la integridad del ADN [11]. Particularmente, la RF-EMR emitida por teléfonos móviles, operando típicamente entre 800-2200 MHz, ha sido asociada con alteraciones en parámetros seminales clave [12]. Estudios recientes sugieren que la RF-EMR podría afectar negativamente el movimiento, viabilidad, morfología y concentración de los espermatozoides [10] [13]. Considerando la relevancia clínica de la infertilidad masculina, es esencial aclarar el rol de los CEM en la viabilidad de los espermatozoides [14]. En este sentido, estudios tanto in vitro como in vivo han demostrado que la RF-EMR generada por dispositivos móviles puede causar estrés oxidativo en los espermatozoides, lo que conlleva un incremento en la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y daño en

el ADN espermático [14]. Por ejemplo, Agarwal et al. observaron una reducción considerable en la motilidad y viabilidad espermática en hombres que usaban teléfonos móviles por más de cuatro horas al día [15]. Sin embargo, De Iuliis et al. indicaron que la exposición a RF-EMR disminuye la motricidad y vitalidad de los espermatozoides, al mismo tiempo que aumenta la fragmentación del ADN [16].

Esta revisión tiene como objetivo examinar sistemáticamente el efecto de los CEM en la viabilidad y mortalidad de los espermatozoides, considerando factores como la duración de la exposición, la frecuencia de los CEM y los mecanismos moleculares subyacentes, tales como el estrés oxidativo y la alteración de las vías de señalización celular [17]. En vista de estos factores, surge la pregunta: ¿de qué manera afecta la exposición prolongada a la RF-EMR generada por teléfonos móviles a la motilidad espermática en el hombre?

III. CARACTERÍSTICAS DE LAS TECNOLOGÍAS MÓVILES

Los CEM se dividen en ionizantes y no ionizantes, siendo estos últimos los que cobran mayor referencia en la vida diaria debido a su gran presencia en dispositivos como teléfonos móviles. En diferencia de la radiación ionizante, que puede dañar directamente el ADN, está asociada a procedimientos médicos como radioterapia y tomografías, en este contexto, la RF-EMR genera preocupación por sus efectos acumulativos en la salud reproductiva masculina [18].

TABLA I. Efectos de los campos ionizante Y no ionizante

Efectos de los campos ionizante y no ionizante			
Tipo de radiación	Fuente comunes	Efectos en salud reproductiva masculina	Ref.
No Ionizante	Teléfonos móviles, Wi-Fi, microondas	- Alteración de la morfología espermática. - Disminución de conteo y motilidad espermática. - Aumento de estrés oxidativo y fragmentación de ADN.	[19],[20]
Ionizante	Rayos X, Angiografía, Radioterapia, Tomografía computarizada.	- Infertilidad - Disrupción hormonal y apoptosis celular - Daño directo al ADN y mutaciones.	[21], [22]

En la TABLA I, se muestra cómo la exposición prolongada a los campos electromagnéticos de radiofrecuencia (RF-EMF) reduce la calidad del semen, afectando así la motilidad, morfología y viabilidad de los espermatozoides, e incrementa el estrés oxidativo y la fragmentación del ADN espermático [19, 20]. Mientras que la radiación ionizante tiene umbrales de daño claros. Ejemplo: 0.1–6 Gy para infertilidad temporal o permanente [21], los efectos de la no ionizante son más sutiles pero persistentes [19].

En este sentido, los teléfonos móviles operan con antenas que transmiten CEM no ionizantes, y con el tiempo, estas tecnologías de transmisión de datos han evolucionado considerablemente [23]. Entre las tecnologías, podemos

mencionar la 1G o sistema telefónico avanzado para móviles (AMPS), que solo permitía realizar llamadas de voz a una frecuencia de 800 MHz [24]. Posteriormente, surgió la tecnología 2G o sistema global para comunicaciones móviles (GSM), que incorporó las funciones de envío de texto y acceder a internet. Sus frecuencias podían variar entre una combinación de 850-1900 MHz o 900-1800 MHz, dependiendo del dispositivo móvil [24]. Con el paso del tiempo, se incorporó la tecnología 3G o Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS). Entre sus características destacan la transferencia de datos, la conexión a internet y las videollamadas. Este sistema opera en un rango de frecuencias de 800-900 MHz o 1700-2100 MHz, dependiendo del operador [24]. Los avances tecnológicos dieron paso a la 4G o evolución a largo plazo (LTE), trabajan en bandas de frecuencia de 700 MHz, 1700/2100 MHz y 2500-2690 MHz. Entre sus principales características, destacan el aumento de velocidad en el acceso a internet, las videoconferencias y la transmisión en alta definición (HD) [24]. En la actualidad, contamos con la tecnología más avanzada en transmisión de datos: el 5G. Este sistema ha sido diseñado para optimizar la comunicación entre dispositivos y expandir el internet de las cosas (IoT). Opera en un rango de frecuencias de 30-100 GHz, con la posibilidad de alcanzar frecuencias de hasta 300 GHz [25].

IV. ABSORCIÓN DE ENERGÍA SAR Y RF EN EL CUERPO

La Tasa de Absorción Específica (SAR) mide la energía de radiofrecuencia (RF) absorbida por el cuerpo humano debido a la exposición a CEM [26]. El SAR se expresa en unidades de vatios por kilogramo (W/kg) y es una medida utilizada para evaluar la seguridad de dispositivos móviles [27]. Según el procedimiento de las normas, el valor del campo eléctrico se mide con una sonda miniatura de campo eléctrico. De hecho, las sondas de campo eléctrico/antena monopolar son el sensor más adecuado para medir el SAR, debido a su sensibilidad y rápida respuesta [28]. El SAR (W/kg) se relaciona con el campo eléctrico, en una muestra de conductividad s (s/m), y densidad r (kg/m^3) por la siguiente formula:

$$SAR = \sigma |E|^2 \frac{2}{\rho} (W/kg - 1)$$

Donde E es la intensidad del campo localizado de la raíz-cuadrada medida en V/m [18]. El límite máximo de la tasa de absorción específica para prevenir efectos térmicos graves que debe adoptar la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) es de 1.6 W/kg promediado sobre 1 gramo de tejido [29].

TABLA II. Comparación de niveles de absorción por el SAR

Tipo de tejido/Modelo	Frecuencia (MHz/GHz)	SAR (W/kg)	Resultado sobre fertilidad o calidad seminal	Ref.
Espermatozoi de humano (in vitro)	900-2450 MHz	1.0-2.8	Disminución leve en la vitalidad espermática	[30]
Espermatozoi de de rata (modelo animal)	900 MHz – 2.45 GHz	0.9 – 1.8	Disminución en motilidad, aumento de apoptosis	[31]
Tejido muscular	900 MHz	0.15-0.4	Absorción moderada	[32]
Tejido Blando (Piel, tejido conectivo)	900 MHz	0.1-0.2	Baja absorción	[33]
Tejido Oseo (tejido rígido)	900 MHz	0.01-0.03	Mínima absorción	[33]

La energía de RF absorbida depende de factores como la frecuencia, la densidad de potencia y la distancia de la fuente de radiación [15]. Los valores de SAR elevados representan más energía absorbida y un potencial de mayor calentamiento en los tejidos y posiblemente la presencia de efectos fisiológicos, siendo así la profundidad de penetración una preocupación en la exposición al CEM [3]. En la TABLA II, se observa una comparativa de absorción por SAR de los diferentes tipos de tejidos biológicos y modelos experimentales bajo exposición a CEM. En esta se evidencian mayores niveles de absorción en espermatozoides comparados con tejidos musculares, rígidos y blandos. Se refleja la sensibilidad a la RF, especialmente en el rango 900 MHz a 2.45 GHz. En la actualidad investigaciones indican que la exposición prolongada a CEM de RF puede aumentar las ROS en los espermatozoides, lo que provoca fragmentación del ADN y reducción de la movilidad espermática [3]. En cuanto al SAR la distribución espacial del cuerpo no es uniforme, con mayores tasas de absorción cerca de la piel y disminución en la profundidad [34]. Con estos factores la distribución desigual complica la evaluación de los impactos biológicos a largo plazo, especialmente en órganos internos como los testículos [32]. En este sentido los componentes eléctricos como los magnéticos del CEM interactúan con el tejido biológico humano, siendo el campo electromagnético el que se absorbe con mayor facilidad [16]. Se ha demostrado que el CEM de RF emitido por un teléfono móvil colocado en el bolsillo puede actuar sobre los testículos y afectar la calidad del esperma en respuesta a la proximidad de la fuente de radiación [35]. Las propiedades dieléctricas de los tejidos, Por ejemplo, los tejidos altos en agua, como el músculo, absorben más energía de RF que los tejidos grasos [36]. Según un informe de 2021 del Parlamento Europeo, el CEM de RF emitido por teléfonos móviles es probablemente carcinogénico y perjudicial para la fertilidad masculina [37].

V. MORFOLOGÍA Y MOTILIDAD DEL ESPERMATOZOIDE

El espermatozoide es la célula reproductora masculina [38]. Su función principal es transportar el ADN paterno hasta el ovocito [38]. En la Fig. 1 se observan las tres partes principales en que se divide el espermatozoide: cabeza, cuello y flagelo [39].

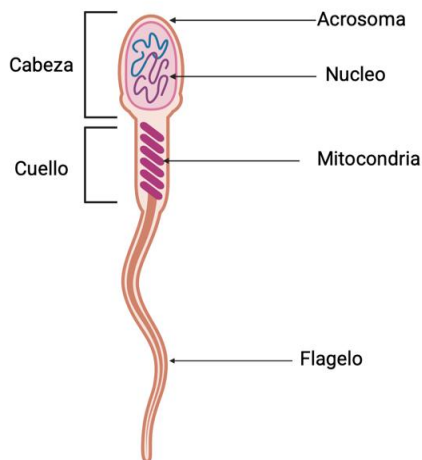


Fig. 1 Partes Principales Del Espermatozoide

En la cabeza se encuentra el núcleo con el ADN y se encuentra cubierta por el acrosoma, esencial para la fecundación. El cuello une la cabeza al flagelo y contiene el centriolo, clave para la organización del axonema [40]. La pieza intermedia contiene mitocondrias dispuestas helicoidalmente que suministra energía (ATP) para el movimiento del flagelo [41]. El flagelo es responsable de la motilidad espermática, constituido por el axonema con patrón 9+2 de microtúbulos [42]. La motilidad espermática es uno de los factores tomados en cuenta al momento del análisis de la calidad del semen y es una pieza importante para la fertilización [43]. El espermatozoide es una célula con la capacidad de desplazarse por el tracto reproductivo femenino y fecundar un ovocito [44]. Algunos parámetros seminales que se toman en cuenta para evaluar en muestras son: la concentración, siendo el número de espermatozoides que hay por unidad de volumen de semen [101]. Y la viabilidad, refiriéndose a la proporción de espermatozoides que están vivos en una muestra. [102].

TABLA III. Clasificación de los tipos de motilidad espermática

TIPOS	MOVIMIENTO	Ref.
TIPO A (RÁPIDA PROGRESIVA)	Movimiento hacia adelante y lineal	[45]
TIPO B (LENTA PROGRESIVA)	Movimiento hacia adelante lento y menos lineal	
TIPO C (NO PROGRESIVA)	Movimiento ondulatorio o en círculos, sin avance significativo.	
TIPO D (INMOVIL)	Sin movimiento detectable	

La fecundación está condicionada a la motilidad espermática. En la TABLA III, se muestra cómo se clasifican los tipos de motilidad que tienen los espermatozoides, para este proceso de fecundación los espermatozoides deben poseer una movilidad tipo A [45]. Por lo tanto, la motilidad espermática toma un rol importante para evaluar la fertilidad de una muestra de semen [46]. Según la OMS, los valores de referencias para un análisis seminal normal incluyen: volumen del semen de al menos 1.5 ml, un total de 39 millones de espermatozoides por eyaculación, una concentración de espermatozoides de 15 M/ml, con una motilidad total del 40%, motilidad progresiva del 32% y un porcentaje de formas morfológicamente normales no inferior del 4% [45]. En diferentes estudios se justifica que el estilo de vida y otros factores ambientales pueden conducir a la infertilidad masculina afectando la motilidad en los espermatozoides, por ejemplo: varicocele [47], anomalías genéticas [48], anomalías mitocondriales [49], Abstinencia sexual [50], estrés psicológico [51] y radiación [18] siendo este último el factor de interés en la presente investigación.

VI. EFECTOS BIOLÓGICOS DEL USO DEL TELÉFONO CELULAR EN LA FERTILIDAD HUMANA

El uso de RF-EMR en los teléfonos móviles pueden llegar a manipular los espermatozoides mediante dos mecanismos clave: efectos térmicos y no térmicos [52]. Al ser absorbido por el cuerpo, parte de la energía se transforma en calor, con eso siendo el efecto térmico. El tamaño de calor producido aumenta

directamente en función de la SAR y de la densidad de potencia de la radiación [53]. Estudios demuestran que, al superar los umbrales de este calor, puede empezar a dañar las células [35]. Los testículos en el hombre mantienen una temperatura aproximadamente 2°C menor que la corporal esto es para garantizar una espermatogénesis adecuada [35]. El aumento de temperatura por exposición a RF-EMR puede dañar el ADN espermático, provocando la muerte celular programada (apoptosis) y alterar la estructura de los túbulos seminíferos donde se producen los espermatozoides [54]. Por otro lado, los efectos no térmicos son quizás más preocupantes, ya que ocurren incluso sin calentamiento significativo [55]. Estos incluyen: generación de estrés oxidativo, alteraciones en el potencial de membrana espermático, cambios en las vías de señalización celular, modificaciones en los procesos de proliferación y muerte celular [55].

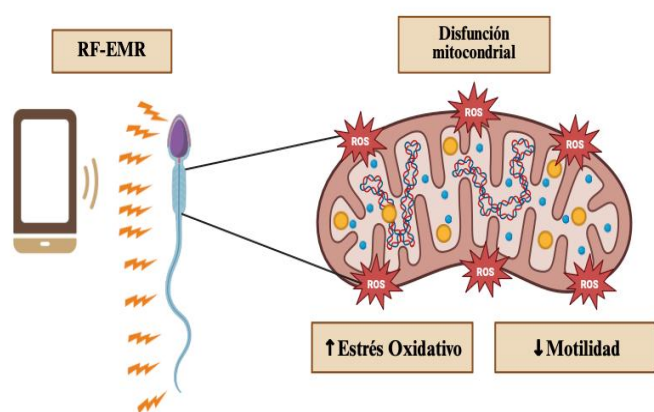


Fig. 2 Impacto de RF-EMR en la calidad del semen: ROS y motilidad espermática

En la **Fig. 2** se muestra cómo la RF-EMR en teléfonos móviles puede aumentar el estrés oxidativo, provocando así afectaciones en la función mitocondrial. Comprometiendo su capacidad en la producción de ATP reduciendo significativamente la motilidad espermática [56]. En este sentido es importante mencionar que los espermatozoides son vulnerables al estrés oxidativo porque carecen de sistemas antioxidantes robustos, ya que contienen abundantes ácidos grasos poliinsaturados en sus membranas [57]. Además, son muy sensibles al daño oxidativo [57, 58]. La radiación activa enzimas como la NADH oxidasa en la membrana plasmática, generando especies ROS [59]. Por lo tanto, con exposiciones prolongadas, la producción de ROS supera la capacidad antioxidante natural, lo que provoca daños al ADN espermático que pueden afectar la fertilidad [60].

VII. EFECTOS FISIOLÓGICOS DEL CEM EN LOS ESPERMATOZOIDES

Estudios en animales han demostrado que los CEM pueden presentar efectos genotóxicos y conducir a un daño significativamente mayor del ADN en ratas después de la exposición a campos magnéticos de 60 Hz, 10 µT durante 24 o 48 horas [61]. En humanos, también se ha reportado que los EMF de 50 Hz elevan las frecuencias de intercambios de cromátidas hermanas en los linfocitos [62]. Yu G et al. muestran que al tener exposición a RF-EMR puede reducir la motilidad de los espermatozoides tanto en humanos como en

animales. Se identificaron diferencias regionales, siendo más pronunciados los efectos negativos en Europa del Este y Asia Occidental [63]. Se sugiere que la RF-EMR induce disfunción mitocondrial en los espermatozoides, aumentando la producción de ROS y provocando daño oxidativo al ADN, lo que afecta negativamente la motilidad espermática [64]. El ROS se genera principalmente en la membrana interna de la mitocondria durante fosforilación oxidativa, este es un proceso vital para la generación de energía celular [65]. En este proceso, actúan complejos proteicos en conjuntos para la transferencia de electrones, que son proporcionados por el NADH, hacia el oxígeno molecular (O_2). Este traslado de electrones se complementa con bombeo activo de protones (H^+) desde la matriz mitocondrial a la intermembrana, esto genera un potencial en la membrana mitocondrial. Esta interacción de los protones genera el ATP cuando los protones vuelve a la matriz a través del complejo enzimático V [66].

En otras condiciones de estrés o difusión, los electrones se dispersan de la cadena de transporte mitocondrial, dando lugar a la formación parcial de superóxido (O_2^-). Este radical se puede liberar hacia la matriz mitocondrial como hacia el espacio de la intermembrana, particularmente desde los complejos I y III [67]. En reacción a esto, las enzimas superóxido dismutasas (SOD) transforman de manera inmediata el (O_2^-) en peróxido de hidrógeno (H_2O_2), que posteriormente se reduce a agua (H_2O) por el glutatión peroxidasa (GPX). Sin embargo, tanto el (O_2^-) y el (H_2O_2) se consideran como ROS mitocondriales, y su alto nivel puede atribuir al daño oxidativo de la membrana del espermatozoide. Además, el (O_2^-) puede tener una reacción con el óxido nítrico (NO) para formar ($ONOO^-$), lo que puede aumentar el daño celular [68]. Esta acción trae repercusión en el flagelo ya que la energía mitocondrial lo impulsa y mientras menos ATP, menos propulsión tendrá [69]. La membrana plasmática es vulnerable al daño oxidativo alterando su fluidez y funcionabilidad [75]. El ADN nuclear ubicado en la cabeza espermática se puede fragmentar por causa de la RF-EMR reduciendo la calidad genética [70]. Diversos estudios sugieren que los espermatozoides son altamente vulnerables al estrés oxidativo debido al elevado nivel de ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) en su membrana [71]. La sobreproducción ROS puede impulsar la reacción acrosómica prematura, afectando negativamente la fertilización [72]. El estrés oxidativo altera la integridad de la membrana acrosómica, arriesgando su capacidad de fusión con la zona pelúcida [73]. Los ROS peroxidan lípidos en la membrana que recubre el acrosoma, lo que interfiere con la liberación enzimática necesaria para la penetración del ovocito [74]. La estructura acrosómica es altamente vulnerable a la peroxidación lipídica inducida por ROS debido a su alto contenido en ácidos grasos poliinsaturados [75]. La exposición sostenida a ROS puede causar una disminución en la expresión de proteínas acrosómicas funcionales, lo que reduce la competencia fecundante del espermatozoide [76].

VIII. METODOLOGÍA DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para alcanzar objetivo de este artículo, se realizó una investigación rigurosa y actualizada sobre de la motilidad

espermática y los efectos del CEM en el cuerpo humano. A continuación, se describen las etapas principales del proceso metodológico:

- Selección de base de datos:* se utilizaron los medios de bases de datos científicas como Pubmed, Google Scholar, IEEE Xplore y Scielo para abarcar la información más amplia posible.
- Estrategia de Búsqueda:* Las palabras claves utilizadas fueron: “Radiación electromagnética”, “motilidad espermática”, “fertilidad humana”, “tecnología móvil”, entre otros. Utilizamos estos términos con operadores booleanos (AND, OR) para hacer un filtro detallado de la información.
- Criterios de inclusión y exclusión:* se tomaron estudios que estén relacionados directamente con el tema, que la información sea robusta y creíble dentro del campo del entendimiento sobre el tema de la exposición a los CEM. Se excluyeron los temas que no tenían información relevante sobre el enfoque de la investigación y los documentos del 2020 hacia abajo.
- Proceso de evaluación:* Se inicio con la lectura de los documentos enfocándonos en los títulos, resumen y resultados, en base a la información aquellos textos seleccionados se realizaba una lectura completa del documento para la búsqueda de información relevante para nuestros objetivos de investigación.
- Extracción y síntesis de datos:* los datos seleccionados por su metodología, resultados y conclusiones fueron sintetizados en el documento para la comprensión y actualización de la investigación sobre las consecuencias de los CEM en la motilidad espermática.

IX.RESULTADOS

X.CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS ESTUDIOS REVISADOS

Los estudios seleccionados como se muestra en la Tabla VI, abarcan diversas metodologías. Incluyendo modelos in vitro, siendo el 60% de los casos con exposición directa de espermatozoides a campos electromagnéticos, por otro lado, modelos in vivo con un 40% utilizando principalmente roedores como sujetos experimentales, y algunas observaciones clínicas en poblaciones humanas. Los parámetros clave analizados muestran que las frecuencias empleadas se distribuyen equitativamente entre bajas 850-1000 MHz siendo un 50% de estudios realizados y altas entre 1800-2200 MHz, siendo también un 50% analizados, con intensidades de radiación SAR que varían desde 0.1 hasta 27.5 W/kg, aunque la mayoría de estos casos se concentran en el rango de 1-2 W/kg, correspondiente a la exposición típica de dispositivos móviles convencionales. En cuanto a la población objetivo, los estudios in vitro utilizan principalmente muestras de semen humano, mientras que los in vivo emplean modelos animales como ratas Wistar o ratones C57BL/6. Los protocolos de exposición presentan variaciones significativas: el 30% son exposiciones agudas ≤ 1 hora, el 50% de mediano plazo 1 hora a 30 días y 20% crónicas >30 días, observándose que las exposiciones prolongadas generan efectos más severos en los parámetros espermáticos. Sin embargo, aproximadamente el 40% de los estudios presentan limitaciones metodológicas al no especificar completamente parámetros clave como la distancia de

exposición, la modulación de la señal o las condiciones ambientales de control.

XI.IMPACTO DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN LA MOTILIDAD ESPERMÁTICA

Los CEM de baja frecuencia (50 Hz) han evidenciado la disminución con alto impacto en la motilidad espermática. Górski et al. en un estudio in vitro, mostraron que, tras 30 min de exposición, la motilidad Tipo A tuvo una disminución significativa en presencia de CEM. Sin embargo, al utilizar las pantallas dielécticas se redujo los efectos negativos, manteniendo la motilidad espermática normal. Estos resultados indican que las alteraciones en los espermatozoides, específicamente en los microtúbulos y la ROS en menor escala pueden variar según el nivel de frecuencia que se expongan los espermatozoides [29]. Por otro lado, la exposición a RF-EMR de 1.8 GHz, típica de los teléfonos móviles, evidencio un impacto significativo en la calidad de los espermatozoides [77]. Según la investigación de Luiis et al. los espermatozoides expuesto a niveles de SAR 1.0 W/kg dio como resultado a una disminución de la motilidad de $86\% \pm 2\%$ a $68\% \pm 2\%$ ($p < 0.05$) y la vitalidad de $89\% \pm 3\%$ a $65\% \pm 1\%$ ($p < 0.01$); en estas disminuciones se observaron parámetros de SAR hasta de 4.3 W/kg, estos efectos alcanzaron un efecto por encima de lo normal manteniéndose estable en estas condiciones, esto indica que en la muestra estudiada se encontró un grupo de espermatozoides afectados por la exposición [80].

XII.RELACIÓN DOSIS – RESPUESTA EN LA MOTILIDAD ESPERMÁTICA

En la TABLA V, se presenta una relación directa entre los parámetros de exposición a RF-EMR y los efectos sobre la calidad espermática. En los teléfonos móviles entre 850MHz-4GHz, tomando el rango SAR de 0.42-2.1 W/kg con exposiciones desde 1 hora hasta 6 años provoca disminución en la motilidad y aumento de anomalías morfológicas y estrés oxidativo. Por otro lado, los generadores de RF-EMR a 900MHz - 27.5GHz presentan un rango más amplio de SAR que varía entre 0.4 - 27.5 W/kg mostrando daños agudos en menos de 24 horas, cuando se superan a 2 W/kg. Sin embargo, exposiciones prolongadas a 5 semanas a intensidades moderadas afectan parámetros hormonales y la calidad del semen. Es importante mencionar que estos hallazgos revelan que la combinación de frecuencia, intensidad del SAR y tiempo de exposición determina la severidad del impacto, siendo especialmente relevantes las exposiciones prolongadas mayores a 30 días incluso a SAR moderados 0.4 - 2 W/kg), niveles comunes en el uso cotidiano de dispositivos móviles. Los estudios revisados demuestran una correlación entre la dosis de exposición RF-EMR y los efectos adversos sobre la motilidad espermática. Esta relación se presenta tanto en la intensidad SAR, como en la duración de la exposición, donde los niveles más altos prolongados se asocian con mayores alteraciones y tiempo de exposición, por ende, se observan efectos más pronunciados asociándose con mayores alteraciones en los parámetros seminales.

TABLA V. Relación Dosis – Respuesta en la Motilidad Espermática

Fuente RF-EME	Rango de Frecuencia	Rango de Tiempo de Exposición	Rango de SAR (W/kg)	Efectos Observados	Cantidad de Estudios
Teléfonos móviles	850 MHz – 42 GHz	1h – 6 años	0.42 - 2.1	↓ Motilidad progresiva ↑ Anomalías morfológicas ↑ Estrés oxidativo	12
Generadores de RF-EME	900MHz – 1.8 GHz	16 h – 8 semanas	0.4 - 27.5	↓ Calidad espermática Daño en el ADN Alteración hormonal	3

XIII. ESTRÉS OXIDATIVO Y DAÑO CELULAR

Los estudios presentan la evidencia de que la radiación genera ROS, lo que contribuye al daño celular y perjudica la calidad del espermatozoide. El exceso de ROS produce estrés oxidativo comprometiendo la integridad funcional del espermatozoide [78]. Este proceso afecta directamente las mitocondrias, disminuyendo la producción de ATP. También tiene efectos directos como el aumento en la fragmentación genética,

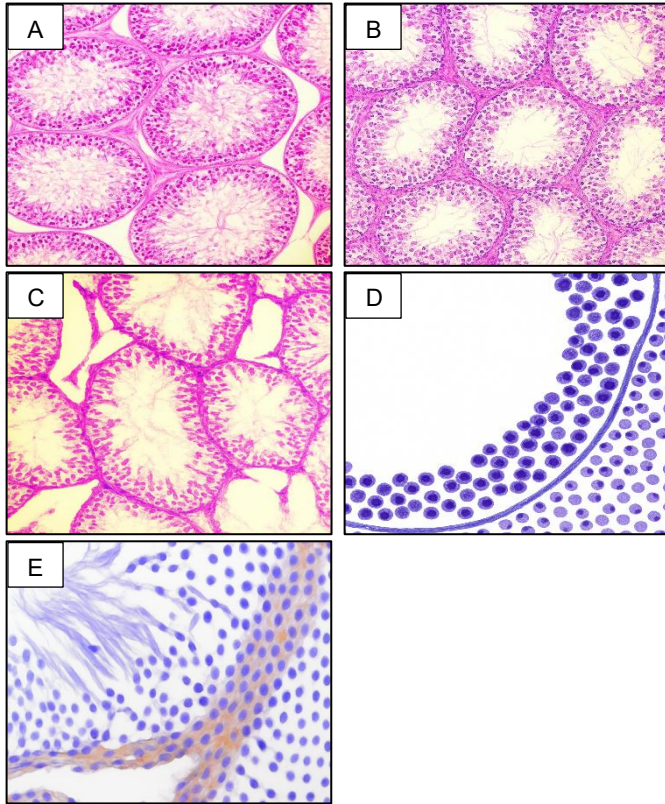


Fig. 3 Resultados Obtenido de los efectos histopatológicos y moleculares a la exposición de ELF-EMF de 50 Hz en los testículos de ratas durante diferentes periodos de tiempo [109].

oxidación de la membrana lipídica, daños en el ADN y proteínas que como consecuencia disminuye la viabilidad y la motilidad espermática [91].

En la TABLA V, se muestran estudios in vitro con células espermáticas humanas [16], se reportó un incremento de ROS y daño mitocondrial tras exposiciones a frecuencias de 2900 MHz, con niveles de SAR entre 1 y 3 W/kg [81], incluso con tiempos de exposición relativamente cortos. Estos hallazgos refuerzan la hipótesis que la RF-EMR actúa como un desencadenante de estrés oxidativo en células germinales masculinas. M. Cetkin et al realizaron un estudio para analizar los efectos de la exposición a ELF-EMF utilizando ratones. Los resultados se representan en un conjunto de imágenes en la Fig. 3. en la figura A se observaron una leve propagación de las células germinales de su distribución normal, hubo una reducción en el conteo y una maduración celular prematura de la espermatogénesis de estas células que fueron expuesta por un mes. A diferencia del grupo de la Fig. B que los efectos se intensificaron después de 2 meses exposición, en donde la distribución celular se observó más desordenada, se notó una reducción considerable de las células germinales. En el grupo de la Fig. C en donde su tiempo de exposición fue de 3 meses se encontró con la desaparición de las células germinales en su mayoría, en donde se dificultó la detección espermatogénica junto con una reducción de las células de Leydig. Otros resultados arrojaron en el análisis inmunohistoquímico un nivel alto de la proteína proapoptótica bax en la exposición por 2 meses y está disminuyendo en el grupo de 3 meses (Fig. C). La manifestación de la proteína BCL-2 en el primer mes fue casi nula, en el segundo mes fue más fuerte y en el tercer mes se mostró más débil (ver fig. E). Los resultados muestran que las alteraciones fueron de manera exponencial en el equilibrio apoptótico de las células germinales, relacionado con el tiempo de exposición a la ELF-EMF [92]. Li et al. [79] encontraron en su investigación que la exposición de RF-EMF de 1800 MHz (SAR de 4 W/kg) arrojó que se produce la autofagia por medio de AMPK/mTOR y genera un daño en el ADN del espermatozoide del sujeto de estudio, en este caso un ratón. Este proceso está determinado de manera parcial por la melatonina, que evita la producción de ROS haciendo que la autofagia actúe como un protector contra el daño del ADN. Este resultado nos indica lo perjudicial que puede ser una exposición en estos parámetros.

TABLA VII. Resultados Obtenidos

Parámetro evaluado	Disminución (%)	Incremento (%)	Sin cambios (%)	Total, de estudios
Motilidad	66.7% (10/15)	6.7% (1/15)	26.6% (4/15)	15
Concentración	53.3% (8/15)	0% (0/15)	46.7% (7/15)	
Viabilidad	53.3% (8/15)	0% (0/15)	46.7% (7/15)	

En la TABLA VII se observa el análisis comparativo de los resultados experimentales seleccionados. Este análisis de las partes afectada de la morfología del espermatozoide bajo diferentes tipos de condiciones experimentales. La cabeza del espermatozoide es la región más afectada, que resulta importante destacar por su papel en la fertilización. Los estudios in vivo que se realizaron en ratones muestran alteraciones muy generalizadas en diferentes regiones

TABLA VI. Cuadro Comparativo De Los Estudios Existentes

Fuente RF-EME	Tipo de estudio	Parámetros Seminales			Observaciones	Frecuencia	Tiempo de exposición	SAR (W/kg)	Ref.
		Viabilidad	Concentración	Motilidad					
Teléfonos Móviles (2G, 3G)	<i>In vitro (humano)</i>	↓	↓	↓	<i>Daño mitocondrial</i>	900MHz	16 h continuas	1-3-2.1	[80]
Teléfonos Móviles (GSM)	<i>In vitro (humano)</i>	↓	↓	X	<i>Estrés oxidativo</i>	850-1900MHz	1h/5 días	1.46	[81]
Teléfonos Móviles (4G)	<i>Animal, experimental</i>	↓	X	↓	<i>Estrés oxidativo y apoptosis</i>	1800MHz	2h/día, 60 días	0.45	[82]
Teléfonos Móviles (GSM)	<i>Animal, experimental</i>	↓	X	X	<i>Daño en las células germinales maduras</i>	900 MHz	2h/día, 30 días	0.2-2	[83]
Teléfonos Móviles (GSM)	<i>In vitro (humano)</i>	X	X	↓	<i>Fragmentación del ADN (SDF) y disminución acrosoma</i>	900 MHz	1 h	-	[84]
Teléfonos Móviles (GMS)	<i>In vitro (humano)</i>	↓	↓	↓	<i>Fragmentación del ADN (SDF) y apoptosis</i>	900 MHz	1h	0.1 - 4	[85]
Teléfonos Móviles (GSM, 3G, 4G)	<i>Humano, observacional</i>	X	X	↓	<i>Exposición acumulativa</i>	Uso diario	Crónico > 1año	-	[86]
Teléfonos Móviles (5G)	<i>In vitro</i>	X	X	↑	<i>Cambios en movilidad de esperma por interacción superficial</i>	42 GHz	30min	0.2	[87]
Teléfonos Móviles Y Dispositivos Inalámbricos	<i>Revisión</i>	↓	↓	↓	<i>Deterioro en la motilidad progresiva y total de los espermatozoides</i>	900MHz - 2.4 GHz	Exposición crónica	0.1-2	[88]
Generador De RF-EME	<i>Animal, experimental</i>	↓	X	↓	<i>Aumento de Ros mitocondriales y daño en el ADN espermático</i>	905 MHz	12 horas	2.2	[89]
Sistema De Guía De Ondas Cilíndrico Ajustada a 1.8 GHz, Simula La Frecuencia De Telefono Móviles	<i>In vitro</i>	X	X	↓	<i>Aumento de ROS en mitocondrias, daño oxidativo al ADN y fragmentación del ADN</i>	1.8 GHz	16 h	0.4 - 27.5	[15]
Teléfonos Móviles	<i>In vivo (animales)</i>	X	↓	X	<i>Estrés oxidativo en células Leydig</i>	850 - 1850 MHz	30min/día hasta 24 h/día x 20 días a 6 semanas	2	[89]
Teléfonos Móviles	<i>In vivo (humanos)</i>	X	↓	X	<i>Afectación del eje HPG</i>	850 - 1850 MHz	4 semanas hasta 6 años de uso móvil	1.6	[90]
Dispositivo Experimental De 900 MHz (Simula Frecuencias Telefónicas)	<i>In vivo (animales)</i>	↓	↓	↓	<i>Aumento de anomalías morfológicas en espermatozoide</i>	900 MHz	2h/día x 8 semanas	1.075	[91]
Teléfonos Móviles (GSM)	<i>In vivo (ratas Wistar)</i>	X	↓	↓	<i>Estrés oxidativo, disminución en peso y conteo espermáticos.</i>	900 MHz	1h/día, 30 días	0.1-1.5	[92]

↓: Disminución del porcentaje.

X: Sin alteración.

-: No especificado

del espermatozoide, como las alteraciones del escroto, la producción y viabilidad dentro del mismo, Mostrando resultados más acercados a la exposición en condiciones reales. A diferencia de los estudios in vivo que su estudio es más controlado dando resultados más precisos del espermatozoide y sus alteraciones biológicas y morfológicas estudiando la cabeza y en menos proporción el cuello y el flagelo. En la **Fig. 4**, Houston et al. Utilizaron una maquina dedicada para la generación de RF-EME por 12 h al día a una frecuencia de 905 MHz, con un SAR específico de 2.2 W/Kg, a un periodo de 1 a 5 semanas. Los resultados obtenidos al observar los testículos del ratón no mostraron diferencia de la morfología entre los individuos que fueron utilizados en la exposición simulada a los de la no simulada. Para el análisis del ROS en los testículos producidos por la exposición la RF, se utilizó anticuerpo γ H2AX como un marcador de roturas de doble cadena, se obtuvo que no hubo daño significativo del ADN, ya que los parámetros de γ H2AX se mantuvieron consistentes en todo el análisis. Sin embargo, al momento de analizar la exposición de la RF-EMR directamente en el espermatozoide, se observó un impacto en su viabilidad. En donde se observaron que los espermatozoides después de 5 semanas que estaban aislados por el epidídimo mostraron reducción de viabilidad y motilidad a causa de la exposición de la RF-EME. Además, al evaluar los niveles de ROS y afección del ADN directamente en el espermatozoide, utilizando una sonda fluorescente de dihidroetidio (DHE), en donde se obtuvo un valor aproximado del 14% y 75% de muestras teñidas con esta sonda. no se encontró un daño significativo por ROS dentro de los testículos, a comparación con la exposición directa al espermatozoide si hubo un contraste con el ROS generado dentro de la mitocondria en donde las primeras 3 semanas de exposición si hubo daño significativo en la mitocondria, pero se observó que la 5 semana de exposición hubo una normalización en los niveles de ROS en la célula. Dando como resultado los daños leves ocasionados por estos tipos de exposiciones de un 5% a 6% en la fragmentación del ADN en las primeras 3 semanas.

XIV.DISCUSIÓN

La evidencia analizada en esta revisión sugiere que la exposición por los RF-EMR tiene efectos negativos a la motilidad espermática. El crecimiento exponencial de las tecnologías móviles y su posible relación con la infertilidad masculina ha captado la atención de la comunidad científica y medica [93]. Las investigaciones realizadas son un reflejo de la importancia de comprender porque son necesarios este tipo de estudios, sin embargo, al pasar el tiempo sigue creciendo la necesidad de comunicarnos constantemente para fines laborales o recreativos. El incremento de los dispositivos móviles lleva el desarrollo de otros recursos tecnológicos, como las antenas móviles, para garantizar la señal activa y una buena recepción [94]. En los CEM de baja frecuencia (ELF-EMF) se pueden encontrar alteraciones histopatológicas progresivas en el tejido testicular y aumento en el ROS, pero hay que destacar que no tiene alteraciones significativas en la motilidad y la concentración del espermato [95]. A comparación con estudios que las frecuencias de 900 MHz si tienen consecuencias negativas en la fertilidad masculina, disminuyendo parámetros espermáticos, hormonales y la fisiología del testículo [96]. Estos estudios dan énfasis a los efectos del ROS y la inflamación testicular como principales causantes de la infertilidad masculina por EMF. Sin embargo, dando una dosis de espermina se logró crear una capa protectora considerable para evitar daños, obteniendo una restauración moderada de la esteroidogenesis y la espermatogénesis, también reduciendo el ROS, la inflamación y daños en el ADN. Estos resultados potencian el uso de la espermina como un agente terapéutico a estas problemáticas de fertilidad asociadas a los EMF. Pero aun existiendo estos avances se requieren más estudios que avalen estos procedimientos y su aplicación en investigaciones clínicas.

Los hallazgos de este estudio muestran investigaciones previas que reportan efectos adversos de la RF-EMR en la fertilidad masculina. De Iuliis et al. señala que la exposición a 1.8 GHz induce estrés oxidativo en espermatozoides humanos in vitro,

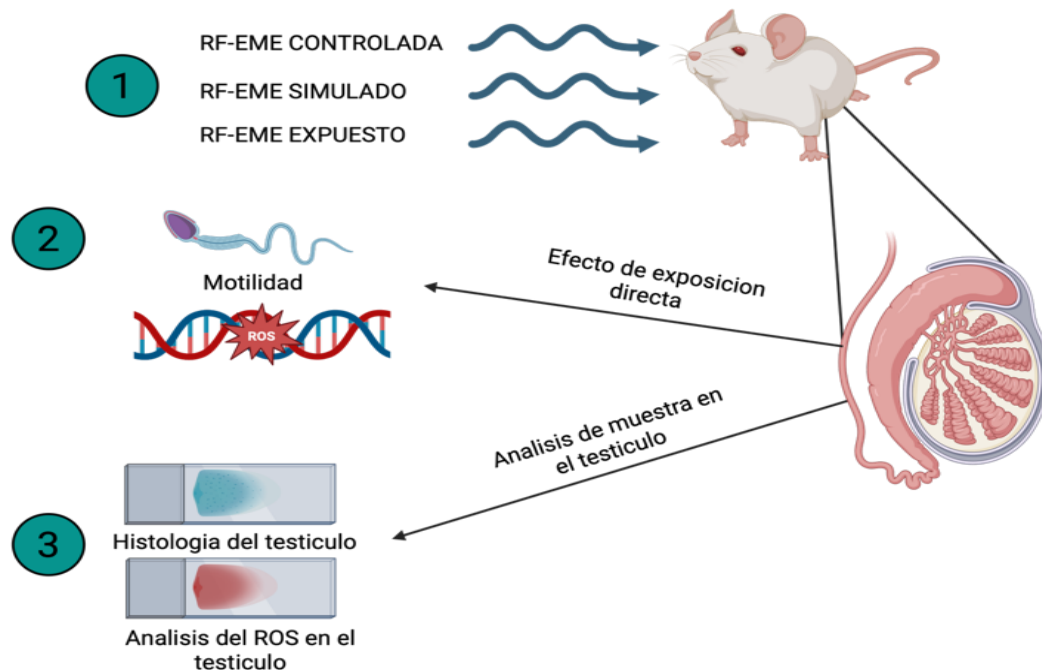


Fig. 4 Impacto de la exposición a RF-EME en la viabilidad y motilidad de los espermatozoides. Imagen basada en [95]

disminuyendo la motilidad a un 54%, aumentando así la fragmentación del ADN un 29% [80]. Estos resultados coinciden con los de Shahin et al. donde fueron expuestas ratas a 900 MHz dando como resultado disminuciones similares en viabilidad de un 30% y concentración espermática de un 41% [82]. Respalda el papel del daño mitocondrial como mecanismo compartido. Sin embargo, existen diferencias en los efectos sobre las hormonas gonadotrópicas, al igual que Shahin et al. el aumento observado en FSH 79% y LH 35.3% como respuesta a la caída de testosterona de 48.5% [82]. En Çetkin et al. no se detectaron cambios significativos, estas diferencias podrían atribuirse a variaciones en los protocolos experimentales, la tasa de absorción específica SAR: 1.075 W/kg vs. 0.4–2 W/kg o la duración de la exposición de 8 semanas vs 30 días [92]. Además, Maluin et al. destacan en su revisión sistemática que los efectos hormonales se observan más en exposiciones crónicas mayor a 6 meses [90]. Por lo cual subraya la importancia de considerar el factor temporal al comparar estudios.

Los efectos experimentados se explican principalmente por tres vías. Primero, el estrés oxidativo, este se caracteriza por la generación de ROS y la disminución de enzimas antioxidantes como la glutatión peroxidasa y la catalasa [91]. Este desbalance oxidativo induce peroxidación lipídica. Esto provoca daños en las membranas celulares de los espermatozoides comprometiendo su funcionabilidad [80]. Segundo, N. N. Shahin et al. mostró en su investigación la fragmentación del ADN del espermatozoide se pudo observar un aumento de la motilidad de un 6.6 veces con cola en ratas expuestas [91]. Esta investigación coincide con Agarwal et al., quienes asociaron la radiación de móviles con un incremento del 40% en daño al ADN espermático en humanos [81]. Tercero, la disfunción hormonal por alteración de la esteroidogénesis, evidenciada por la baja regulación de la proteína StAR y las enzimas 3 β -HSD/17 β -HSD [91], mecanismo también descrito por Sepehrmanesh et al. en modelos animales [97]. De los 15 estudios mostrados en la TABLA VI, en un 26.67% se vio afectado ya sea directamente el flagelo por daños en su morfología y funcionalidad. En un 46.67% de los estudios el cuello tuvo daños en la mitocondria y 66.67% afectando en la zona de la cabeza por disminución del acrosoma, daños y fragmentación del ADN. La RF-EMR afecta directamente la morfología y funcionabilidad del flagelo espermático, provoca deformaciones estructurales en la cola reduciendo la motilidad progresiva del espermatozoide [98]. Al ser afectadas las mitocondrias, reduce la producción de ATP, genera exceso de ROS y compromete el suministro energético necesario para la movilidad espermática [99]. Los efectos en la zona de la cabeza del espermatozoide alteran su morfología, daña la membrana plasmática, afecta la integridad del acrosoma, induce estrés oxidativo y compromete su capacidad para fecundar el óvulo [100]. En la TABLA IV se realiza una comparación de los estudios experimentales seleccionados para este análisis, obteniendo como se impacta la morfología de los espermatozoides en diferentes condiciones. La cabeza del espermatozoide es la región más impactada sabiendo que esta es la parte más importante para la fertilización. Los estudios *in vivo* realizados en ratones crean alteraciones generalizadas, analizando que en este tipo de experimentos son los más semejantes a una exposición real. A diferencia de los *in vitro*

que podemos tener resultados más específicos evaluando la cabeza y en menor proporción, el cuello y el flagelo.

XV. RELEVANCIAS CLÍNICAS Y CONSIDERACIONES PRÁCTICAS

Las implicaciones clínicas de estas investigaciones son bastantes significativas, especialmente con el contexto del uso diario de teléfonos móviles. Tal cual como advierte Aitken et al. en su investigación, el daño acumulativo al ADN espermático podría contribuir al aumento de infertilidad idiopática y riesgos transgeneracionales, como abortos recurrentes o trastornos del desarrollo embrionario [99]. Para mitigar estos riesgos se recomienda: evitar guardar los teléfonos móviles cerca de los testículos, como en los bolsillos delanteros del pantalón [100]. Shahin et al., demostró que la administración de espermina revirtió el daño oxidativo y a su vez mejoró los parámetros espermáticos en ratas [91]. Además, Maluin et al. sugieren reevaluar los límites de SAR para dispositivos móviles, especialmente en poblaciones vulnerables, como adolescentes [90].

XVI. LIMITACIONES DE LOS ESTUDIOS ACTUALES

Los estudios actuales presentan varias limitaciones significativas. Iniciando con que la mayoría de las investigaciones se han realizado *in vitro* o en modelos animales [16][91]. Limitando así la extrapolación directa de los hallazgos a modelos humanos. Como señalan Maluin et al., las diferencias anatómicas y fisiológicas entre especies pueden afectar la absorción de energía y la respuesta biológica a la RF-EMR, lo que subraya la necesidad de estudios epidemiológicos robustos en poblaciones humanas [90]. Otra limitación crítica es la variabilidad metodológica entre estudios, particularmente en los protocolos de exposición. Puesto que algunos investigadores utilizan dispositivos estándar para generar campos electromagnéticos controlados [16], otros emplean teléfonos móviles comerciales [92]. Lo que introduce inconsistencias en la frecuencia, potencia y duración de la exposición. Por otro lado, se puede mencionar también la escasez de estudios a largo plazo en humanos representa una brecha importante en la literatura. Tal cual como advierte Aitken et al., la mayoría de las investigaciones en humanos se basan en cohortes pequeñas o diseños transversales, lo que limita la capacidad para establecer relaciones causales [99].

XVII. RETOS Y OPORTUNIDADES

Las actuales investigaciones en efectos de RF-EMR en la motilidad espermática enfrentan importantes retos, como la falta de estandarización en los protocolos experimentales con variaciones en SAR, frecuencias y tiempos de exposición. Se encuentran diferentes dificultades para replicar condiciones reales de uso de dispositivos móviles y la escasa evidencia sobre el impacto de nuevas tecnologías como el 5G. Además, los mecanismos biofísicos subyacentes no están del todo claros, particularmente a la generación de estrés oxidativo y daño mitocondrial. Sin embargo, estas limitaciones abren oportunidades para desarrollar protocolos estandarizados basados en guías internacionales, implementar modelos experimentales avanzados como lo son sistemas microfluídicos y cultivos 3D. Realizar estudios epidemiológicos longitudinales con monitoreo preciso de exposición, explorar terapias antioxidantes específicas y emplear algoritmos inteligentes

para el análisis de datos masivos o macrodatos. Superar estos desafíos mediante enfoques multidisciplinarios permitirá establecer umbrales de seguridad más precisos y desarrollar estrategias efectivas para proteger la salud reproductiva masculina en un mundo que cada vez utiliza más teléfonos móviles.

XVIII.CONCLUSIÓN

Luego de la revisión de los estudios seleccionados, los datos arrojados por la exposición de las RF-EMF pueden tener un efecto adverso a la motilidad espermática. También afecta otros factores, como el conteo espermático, daño al ADN, alteraciones hormonales y encimas tóxicas. A estos efectos se puede atribuir la infertilidad del hombre, ya que las células, por una exposición prolongada a estas ondas, pueden generar ROS. Pero el camino de estas investigaciones aún es extenso, ya que debemos tener en cuenta otros factores como la obesidad, tabaquismo, entre otros. Son necesarios más estudios experimentales utilizando diferentes técnicas y tipos, ya sea in vivo e in vitro, para tener evidencia actualizada y con mayores datos de los posibles efectos por los CEM. Cada estudio arrojó diferentes datos en donde son similares entre sí y podemos destacar sus ventajas y desventajas.

La motilidad espermática es uno de los factores importante para la fertilización, como se pudo exponer en este artículo. Viendo los resultados de los estudios analizados podemos determinar que la motilidad sí se ve afecta por la emisión de RF-EMR de los teléfonos móviles en diferentes frecuencia específicas, pero recalando que esto se determina por el tiempo de exposición, es decir, se deben realizar análisis y estudios experimentales analizando la posición del dispositivo móvil en los bolsillos del pantalón y su cercanía a los testículos, para tener datos más reales y cercanos al uso diario de estos dispositivos. Esto nos llevará a analizar las posibles soluciones y crear estándares de uso para reducir los problemas de infertilidad producidos por los dispositivos móviles. En los estudios seleccionados presentan un análisis muy concreto del impacto de la RF-EME en la fertilidad de los ratones, tomando en cuenta los efectos claves como la capacidad de los espermatozoides para que se efectúe la reacción acrosómica, la unión de la zona pelúcida y la fertilización del ovulo. Al mayor tiempo de exposición de las RF-EME puede afectar la concentración y calidad del espermato, incluso afectar el desarrollo del embrión. Los resultados de los estudios arrojaron una disminución en la tasa de fertilización y desarrollo de los blastocitos en comparación con los estudios de control. Los resultados de estos estudios experimentales de análisis riguroso nos dan un punto de partida para los riesgos del uso de los teléfonos móviles y cómo estos están ligados con la infertilidad del hombre.

Es importante tener en cuenta la progresión exponencial que se tiene en la tecnología sobre todo en los últimos 20 años. Esto ha implicado evoluciones considerables en la transmisión de datos y comunicación por medio de antenas para la operación de los teléfonos móviles, generando efectos del CEM en la salud reproductiva masculina. Comprender mejor el impacto del RF-EME permitirá plantear medidas para prevenir los efectos que puede causar en la motilidad espermática. De esta manera se podrán ofrecer recomendaciones que contribuyan a

proteger la salud reproductiva en los hombres. Según lo expuesto en este artículo, en siguientes estudios se podrían estandarizar diseños experimentales controlando las variables para así realizar mejores comparativas.

XIX.RECONOCIMIENTOS

Queremos extender un agradecimiento a la Universidad Latina de Panamá por el desarrollo y organización del diplomado en Publicación Científica en Biomédica, a nuestro tutor Dr. Ernesto Ibarra que nos guió en el desarrollo del presente artículo y a la Dra. Gianna Frassati Mora por las contribuciones metodológicas.

XX.REFERENCIAS

1. Maluin SM, Osman K, Jaffar FHF and Ibrahim SF (2021) Effect of Radiation Emitted by Wireless Devices on Male Reproductive Hormones: A Systematic Review. *Front. Physiol.* 12:732420. Doi: 10.3389/fphys.2021.732420
2. World Health Organization, "Infertilidad," WHO, [online]. Available: https://www.who.int/es/health-topics/infertility#tab=tab_1. Accessed: Apr. 29, 2025.
3. Y. Koohestanidehaghi, M. A. Khalili, F. Dehghanpour, and M. Seify, "Detrimental impact of cell phone radiation on sperm DNA integrity," *Clin. Exp. Reprod. Med.*, vol. 51, no. 1, pp. 13–19, Mar. 2024, doi:10.5653/ceerm.2023.06121.
4. J. A. Magalhães, L. S. Ribeiro, J. P. A. Rego, and C. R. Andrade, "Current markers for infertility in men," *JBRA Assist. Reprod.*, vol. 25, no. 4, pp. 592–600, 2021, doi:10.5935/1518-0557.20210013.
5. C. Krausz and A. Riera-Escamilla, "Genetics of male infertility," *Nat. Rev. Urol.*, vol. 15, pp. 369–384, 2018, doi:10.1038/s41585-018-0003-3.
6. M. L. Eisenberg, S. Kim, Z. Chen, R. Sundaram, E. F. Schisterman, and G. M. Buck Louis, "The relationship between male BMI and waist circumference on semen quality: data from the LIFE study," *Hum. Reprod.*, vol. 29, pp. 193–200, 2014, doi: 10.1093/humrep/det428.
7. E. A. Taha, A. M. Ez-Aldin, S. K. Sayed, N. M. Ghandour, and T. Mostafa, "Effect of smoking on sperm vitality, DNA integrity, seminal oxidative stress, zinc in fertile men," *Urology*, vol. 80, no. 5, pp. 822–825, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.urology.2012.07.002.
8. E. Ricci, S. Al Beitawi, S. Cipriani, M. Candiani, F. Chiaffarino, P. Viganò, S. Noli, and F. Parazzini, "Semen quality and alcohol intake: a systematic review and meta-analysis," *Reprod. Biomed. Online*, vol. 34, pp. 38–47, 2017, doi: 10.1016/j.rbmo.2016.09.012.
9. R. Gautam, E. Priyadarshini, J. Nirala y P. Rajamani, "Impact of nonionizing electromagnetic radiation on male infertility: an assessment of the mechanism and consequences," *International Journal of Radiation Biology*, vol. 98, no. 6, pp. 1063–1073, 11 ene. 2021, doi: 10.1080/09553002.2020.1859154.
10. N. Falzone, C. Huyser, y D. R. Franken, "Mobile phone radiation does not induce pro-apoptosis effects in human spermatozoa," *Radiat. Res.*, vol. 174, no. 2, pp. 169–176, 2010, doi: 10.1667/RR2091.1.
11. A. A. R. Alchalabi, S. H. M. Ali y N. A. Malik, "Specific Absorption Rate Analysis in Human Male Reproductive Organs Due to Mobile Phone Radiation at 900 MHz and 1800 MHz," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 224417–224428, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3044563.
12. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)," *Health Phys.*, vol. 118, no. 5, pp. 483–524, 2020, doi: 10.1097/HP.0000000000001210.
13. M. A. Bhat, "Effects of Electromagnetic Waves Emitted by Mobile Phones on Male Fertility," *Comput. Eng. Intell. Syst.*, vol. 4, no. 3, pp. 51–64, 2013.
14. E. Kivrak, K. Yurt, A. Kaplan, I. Alkan, and G. Altun, "Effects of electromagnetic fields exposure on the antioxidant defense system," *J. Microsc. Ultrastruct.*, vol. 5, no. 4, pp. 167–176, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.jmau.2017.07.003.
15. A. Agarwal, N. R. Desai, K. Makker, A. Varghese, R. Mouradi, E. Sabanegh, and R. Sharma, "Effects of radiofrequency electromagnetic waves (RF-EMW) from cellular phones on human ejaculated semen: an

- in vitro pilot study," *Fertil. Steril.*, vol. 92, no. 4, pp. 1318-1325, oct. 2009. doi: 10.1016/j.fertnstert.2008.08.022.
16. G. N. De Iulius, R. J. Newey, B. V. King, and R. J. Aitken, "Mobile phone radiation induces reactive oxygen species production and DNA damage in human spermatozoa in vitro," *PLoS ONE*, vol. 4, no. 7, p. e6446, Jul. 2009. doi: 10.1371/journal.pone.0006446.
 17. R. J. Aitken, "The human spermatozoon – a cell in crisis?" *J. Reprod. Fertil.*, vol. 115, no. 1, pp. 1–7, Jan. 1999, doi: 10.1530/jrf.0.1150001.
 18. K. K. Kesari, A. Agarwal, and R. Henkel, "Radiations and male fertility," *Reprod. Biol. Endocrinol.*, vol. 16, no. 1, p. 118, Dec. 2018. doi: 10.1186/s12958-018-0431-1.
 19. F. Pacchierotti et al., "Effects of Radiofrequency Electromagnetic Field (RF-EMF) exposure on male fertility and pregnancy and birth outcomes: Protocols for a systematic review of experimental studies in non-human mammals and in human sperm exposed in vitro," *Environment International*, vol. 157, p. 106806, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.envint.2021.106806.
 20. A. Wdowiak et al., "Effect of ionizing radiation on the male reproductive system," *Ann. Agric. Environ. Med.*, 2019.
 21. A. Chougule and M. Joan, "Ionizing radiation and reproductive health," *J. Reprod. Healthc. Med.*, 2025.
 22. International Atomic Energy Agency, "Safety Standards," 1996.
 23. B. Levitt, H. Lai, and A. Manville, "Effects of non-ionizing electromagnetic fields on flora and fauna, part 1. Rising ambient EMF levels in the environment," **Reviews on Environmental Health**, vol. 37, no. 1, pp. 81–122, 2022. doi: 10.1515/reveh-2021-0026.
 24. G. L. Stüber, **Principles of Mobile Communication**, 4th ed., Atlanta, GA: Springer International Publishing, 2017, ISBN: 978-3-319-55614-7.
 25. O. O. FAGBOHUN, "Comparative studies on 3G,4G and 5G wireless technology," *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*, vol. 9, no. 3, p. 7, 2014.
 26. Grupo de Trabajo de la IARC, "Non-ionizing radiation, Part 1: static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields," *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum*, vol. 80, pp. 1–395, 2002.
 27. Comisión Federal de Comunicaciones (FCC), "OET Bulletin 65: Evaluating compliance with FCC guidelines for human exposure to radiofrequency electromagnetic fields," 1997.
 28. Kesari, K. K., Kumar, S., Nirala, J., Siddiqui, M. H., & Behari, J. (2013). Biophysical evaluation of radiofrequency electromagnetic field effects on male reproductive pattern. *Cell Biochemistry and Biophysics*, 65(1), 85–96.
 29. Görski, R., Kotwicka, M., Skibińska, I., Jendraszak, M., & Wosiński, S. (2020). Effect of low-frequency electric field screening on motility of human sperm. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 27(3), 427–434. <https://doi.org/10.26444/aaem/116019>
 30. Cordelli, E., Ardoino, L., Benassi, B., Consales, C., Eleuteri, P., Marino, C., ... & Pacchierotti, F. (2024). Effects of radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure on male fertility: A systematic review of experimental studies on non-human mammals and human sperm in vitro. *Environment International*, 185, 108509.
 31. Kesari, K. K., Kumar, S., & Behari, J. (2012). Mobile phone usage and male infertility in Wistar rats. *Indian Journal of Experimental Biology*, 50(6), 464–470.
 32. A. Christ, N. Kuster, T. Samaras, C. Goiceanu, and A. Bahr, "The dependence of electromagnetic far-field absorption on body tissue composition in the frequency range from 300 MHz to 6 GHz," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 54, no. 5, pp. 2188–2195, May 2006, doi: 10.1109/TMTT.2006.872789..
 33. Y. Sun, C. Dai y Z. Zhang, "Automated Noninvasive Sperm Motility and Morphology Analysis and Selection of Sperm with High DNA Integrity," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 37, no. 6, pp. 1342–1351, Jun. 2018
 34. M. Blank y R. Goodman, "Electromagnetic fields may act directly on DNA," **J Cell Biochem**, vol. 75, no. 3, pp. 369–374, 1999.
 35. Agarwal A, Singh A, Hamada A, Kesari K. Cell phones and male infertility: a review of recent innovations in technology and consequences. *Int Braz J Urol* 2011; 37:432-54.
 36. K. K. Kesari and J. Behari, "Effects of microwave at 2.45 GHz radiations on reproductive system of male rats," *Toxicol. Environ. Chem.*, vol. 92, no. 6, pp. 1135-1147, Aug. 2010. doi: 10.1080/02772240903233637.
 37. N. R. Nyberg, L. Hardell, P. H. N. de Salles, D. L. Davis, and A. F. Pall, "The European Union prioritises economics over health in the rollout of radiofrequency technologies," *Rev. Environ. Health*, vol. 38, no. 1, pp. 163-177, Mar. 2023, doi: 10.1515/reveh-2022-0106.
 38. E. Jodar, T. Selvaraju, P. Sendler, M. Diamond, W. Krawetz, and S. P. Kimmins, "Stability, delivery and functions of human sperm RNAs at fertilization," *Nucleic Acids Res.*, vol. 41, no. 7, pp. 4104-4117, Apr. 2013. doi: 10.1093/nar/gkt132.
 39. R. R. Henkel and W. B. Schill, "Sperm preparation for ART," **Reprod. Biol. Endocrinol. **, vol. 1, p. 108, Nov. 2003, doi: 10.1186/1477-7827-1-108.
 40. R. G. Saacke, "Sperm morphology: Its relevance to compensable and uncompensable traits in semen," **Theriogenology**, vol. 70, no. 3, pp. 473–478, Aug. 2008, doi: 10.1016/j.theriogenology.2008.04.012.
 41. R. J. Aitken, "Sperm function tests and fertility," **Int. J. Androl. **, vol. 29, no. 1, pp. 69–75, Feb. 2006, doi: 10.1111/j.1365-2605.2005.00630.x.
 42. Y. M. Cheng, X. N. Hu, Z. Peng, T. T. Pan, F. Wang, H. Y. Chen, W. Q. Chen, Y. Zhang, X. H. Zeng, and T. Luo, "Lysine glutarylation in human sperm is associated with progressive motility," **Hum. Reprod. **, vol. 34
 43. N. Kumar and A. K. Singh, "Trends of male factor infertility, an important cause of infertility: a review of literature," **Journal of Human Reproductive Sciences**, vol. 8, pp. 191–196, 2015. doi: 10.4103/0974-1208.170370. PMID: 26752853.
 44. Dcunha R, Hussein RS, Ananda H, Kumari S, Adiga SK, Kannan N, Zhao Y, Kalthur G. Current Insights and Latest Updates in Sperm Motility and Associated Applications in Assisted Reproduction. *Reprod Sci*. 2022 Jan;29(1):7-25. doi: 10.1007/s43032-020-00408-y. Epub 2020 Dec 7. PMID: 33289064; PMCID: PMC7721202.
 45. S. M. Stephens, D. M. Arnett, y R. B. Meacham, "The use of in vitro fertilization in the management of male infertility: what the urologist needs to know," *Rev. Urol.*, vol. 15, no. 4, pp. 154–160, 2013. [PMID: 24659912; PMCID: PMC3922320].
 46. E. A. Gaffney, H. Gadêlha, D. J. Smith, J. R. Blake, and J. C. Kirkman-Brown, "Mammalian sperm motility: observation and theory," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 43, pp. 501–528, Jan. 2011. doi: 10.1146/annurev-fluid-121108-145442.
 47. Agarwal A, Sharma R, Harlev A, Esteves S. Effect of varicocele on semen characteristics according to the new 2010 World Health Organization criteria: a systematic review and meta-analysis. *Asian J Andrology*. 2016;18(2):163–70. <https://doi.org/10.4103/1008-682x.172638>.
 48. Leigh MW, Pittman JE, Carson JL, Ferkol TW, Dell SD, Davis SD, et al. Clinical and genetic aspects of primary ciliary dyskinesia/Kartagener syndrome. *Gen Med*. 2009;1
 49. Selvi Rani D, Vanniarajan A, Gupta NJ, Chakravarty B, Singh L, Thangaraj K. A novel missense mutation C11994T in the mitochondrial ND4 gene as a cause of low sperm motility in the Indian subcontinent. *Fertil Steril*. 2006;86(6):1783–5. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2006.04.044>.
 50. Comar VA, Petersen CG, Mauri AL, Mattila M, Vagnini LD, Renzi A, et al. Influence of the abstinence period on human sperm quality: analysis of 2,458 semen samples. *JBRA Assisted Reprod*. 2017;21(4):306–12. <https://doi.org/10.5935/1518-0557.20170052>.
 51. Durairajanayagam D. Lifestyle causes of male infertility. *Arab J Urol*. 2018;16(1):10–20. <https://doi.org/10.1016/j.aju.2017.12.004>.
 52. Habash R. Bioeffects and therapeutic applications of electromagnetic energy. CRC press; 2007.
 53. Kowalczyk CI, Saunders RD, Stapleton HR. Sperm count and sperm abnormality in male mice after exposure to 2.45 GHz microwave radiation. *Mutat Res* 1983; 122:155-61.
 54. A. J. Koppers, G. N. De Iulius, J. M. Finnie, E. A. McLaughlin y R. J. Aitken, "Significance of mitochondrial reactive oxygen species in the generation of oxidative stress in spermatozoa," *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, vol. 93, no. 8, pp. 3199–3207, ago. 2008, doi: 10.1210/jc.2007-2616.
 55. Repacholi MH. Low-level exposure to radiofrequency electromagnetic fields: health effects and research needs. *Bioelectromagnetics* 1998; 19:1-19.
 56. K. Liu, Y. Li, X. Zhang, L. Zhang, Y. Wang, X. Yu, Y. Zeng y P. Zhou, "Association between mobile phone use and semen quality: a systematic review and meta-analysis," *Andrology*, vol. 2, no. 4, pp. 491–501, Jul. 2014, doi: 10.1111/j.2047-2927.2014.00205.x.
 57. A. Agarwal and S. A. Said, "Oxidative stress, DNA damage and apoptosis in male infertility: a clinical approach," *BJU Int.*, vol. 95, no. 4, pp. 503–507, 2005.

58. E. Gavrilouk and R. J. Aitken, "Damage to sperm DNA mediated by reactive oxygen species", *Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol. 868, pp. 23–45, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-18881-2_2.
59. G. R. Salama, "Effects of exposure to electromagnetic fields on male reproduction," *Rev. Environ. Health*, vol. 23, no. 4, pp. 263–272, 2008.
60. A. Gorpichenko et al., "The influence of direct mobile phone radiation on sperm quality," *Central Eur. J. Urol.*, vol. 67, no. 1, pp. 65–71, 2014.
61. H. Lai y N. P. Singh, "H. Lai y N. P. Singh, "Acute exposure to a 60 Hz magnetic field increases DNA strand breaks in rat brain cells," *Bioelectromagnetics*, vol. 18, no. 2, pp. 156–165, 1997, doi: 10.1002/(SICI)1521-186X(1997)18:2<156::AID-BEM8>3.0.CO;2-1
62. M. A. Wahab, J. V. Podd, B. I. Rapley y R. E. Rowland, "Elevated sister chromatid exchange frequencies in dividing human peripheral blood lymphocytes exposed to 50 Hz magnetic fields," *Bioelectromagnetics*, vol. 28, no. 4, pp. 281–288, may 2007, doi: 10.1002/bem.20289
63. Yu G, Bai Z, Song C, Cheng Q, Wang G, Tang Z, Yang S. Current progress on the effect of mobile phone radiation on sperm quality: An updated systematic review and meta-analysis of human and animal studies. *Environ Pollut*. 2021 Aug 1; 282:116952. doi: 10.1016/j.envpol.2021.116952. Epub 2021 Mar 30. PMID: 33862271.
64. Houston BJ, Nixon B, King BV, De Iuliis GN, Aitken RJ. The effects of radiofrequency electromagnetic radiation on sperm function. *Reproduction*. 2016 Dec;152(6): R263-R276. doi: 10.1530/REP-16-0126. Epub 2016 Sep 6. PMID: 27601711.
65. M. P. Murphy, "How mitochondria produce reactive oxygen species," *Biochemical Journal*, vol. 417, no. 1, pp. 1–13, Jan. 2009. doi: 10.1042/BJ20081386
66. X. Li, P. Fang, J. Mai, et al., "Targeting mitochondrial reactive oxygen species as novel therapy for inflammatory diseases and cancers," *Journal of Hematology & Oncology*, vol. 6, p. 19, 2013. doi: 10.1186/1756-8722-6-19
67. N. R. Madamanchi and M. S. Runge, "Mitochondrial dysfunction in atherosclerosis," *Circulation Research*, vol. 100, no. 4, pp. 460–473, 2007. doi: 10.1161/01.RES.0000258450.44413.96
68. E. Cadenas and K. J. A. Davies, "Mitochondrial free radical generation, oxidative stress, and aging," *Free Radical Biology and Medicine*, vol. 29, no. 3–4, pp. 222–230, 2000. doi: 10.1016/S0891-5849(00)00317-8
69. A. Amaral, "Energy metabolism in mammalian sperm motility," *WIREs Mechanisms of Disease*, vol. 14, no. 5, art. e1569, Sep. 2022, doi: 10.1002/wsbm.1569.
70. R. Sciorio, L. Tramontano, and S. C. Esteves, "Effects of mobile phone radiofrequency radiation on sperm quality," *Zygote*, vol. 30, no. 2, pp. 159–168, Apr. 2022, doi: 10.1017/S096719942100037X.
71. R. P. W. Kenny, E. Johnson, A. M. Adesanya, C. Richmond, F. Beyer, C. Calderon, J. Rankin, M. S. Pearce, M. Toledano, D. Craig, y F. Pearson, "The effects of radiofrequency exposure on male fertility: A systematic review of human observational studies with dose-response meta-analysis," *Environ. Int.*, vol. 190, p. 108817, ago. 2024, doi: 10.1016/j.envint.2024.108817.
72. S. Dutta, A. Majzoub, and A. Agarwal, "Oxidative stress and sperm function: A systematic review on evaluation and management," *Arab J. Urol.*, vol. 17, no. 2, pp. 87–97, 2019, doi: 10.1080/2090598X.2019.1599624.
73. A. Agarwal, S. Gupta, and R. Sharma, "Role of oxidative stress in female reproduction," *Reprod. Biol. Endocrinol.*, vol. 3, no. 1, p. 28, 2005. doi: 10.1186/1477-7827-3-28.
74. R. J. Aitken, J. S. Drevet, A. Moazamian, y P. Gharagozloo, "Male Infertility and Oxidative Stress: A Focus on the Underlying Mechanisms," *Antioxidants*, vol. 11, no. 2, p. 306, Feb. 2022, doi: 10.3390/antiox11020306.
75. G. N. De Iuliis, L. K. Thomson, L. A. Mitchell, J. M. Finnie, A. J. Koppers, A. Hedges, B. Nixon, y R. J. Aitken, "DNA damage in human spermatozoa is highly correlated with the efficiency of chromatin remodeling and the formation of 8-hydroxy-2'-deoxyguanosine, a marker of oxidative stress," *Biol. Reprod.*, vol. 81, no. 3, pp. 517–524, Sep. 2009, doi: 10.1095/biolreprod.109.076836.
76. T. Morielli y C. O'Flaherty, "Oxidative stress impairs function and increases redox protein modifications in human spermatozoa," *Reproduction*, vol. 149, no. 1, pp. 113–123, Jan. 2015, doi: 10.1530/REP-14-0240.
77. P. Kaur, U. Rai, y R. Singh, "Genotoxic risks to male reproductive health from radiofrequency radiation," *Cells*, vol. 12, no. 4, p. 594, 2023, doi: 10.3390/cells12040594.
78. R. Singh, R. Nath, A. K. Mathur, and R. S. Sharma, "Effect of radiofrequency radiation on reproductive health," *Indian J. Med. Res.*, vol. 148, Suppl., pp. S92–S99, Dec. 2018, doi: 10.4103/ijmr.IJMR_1056_18.
79. R. Li, M. Ma, L. Li, L. Zhao, T. Zhang, X. Gao, D. Zhang, Y. Zhu, Q. Peng, X. Luo, and M. Wang, "The protective effect of autophagy on DNA damage in mouse spermatocyte-derived cells exposed to 1800 MHz radiofrequency electromagnetic fields," *Cellular Physiology and Biochemistry*, vol. 48, no. 1, pp. 29–41, Aug. 2018. doi: 10.1159/000491660.
80. G. N. De Iuliis, R. J. Newey, B. V. King, and R. J. Aitken, "Mobile phone radiation induces reactive oxygen species production and DNA damage in human spermatozoa *in vitro*," *PLoS ONE*, vol. 4, no. 7, p. e6446, Jul. 2009, doi: 10.1371/journal.pone.0006446.
81. A. Agarwal, F. Deepinder, K. P. Sharma, G. Ranga, and J. Li, "Effect of cell phone usage on semen analysis in men attending infertility clinic: an observational study," *Fertility and Sterility*, vol. 89, no. 1, pp. 124–128, 2008, doi: 10.1016/j.fertnstert.2007.01.166.
82. S. Shahin, S. P. Singh and C. M. Chaturvedi, "1800 MHz mobile phone irradiation induced oxidative and nitrosative stress leads to p53 dependent Bax mediated testicular apoptosis in mice, *Mus musculus*," *J. Cell. Physiol.*, vol. 233, no. 9, pp. 7253–7267, 2018, doi: 10.1002/jcp.26558.
83. A. I. Vereschchaka, V. N. Glukhov, E. A. Berdinskikh, y D. A. Kudriavtsev, "Influence of electromagnetic radiation of a mobile phone on the state of murine male germ cells," *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, vol. 163, pp. 280–282, 2017.
84. A. Zalata, A. Z. El-Samanoudy, D. Shaalan et al., "In vitro effect of cell phone radiation on motility, DNA fragmentation and clusterin gene expression in human sperm," *Int. J. Fertil. Steril.*, vol. 9, no. 1, pp. 129–136, 2015, doi: 10.22074/ijfs.2015.4217.
85. M. Hassanzadeh-Taheri, M. A. Khalili, A. Hosseinienejad Mohebbati et al., "The detrimental effect of cell phone radiation on sperm biological characteristics in normozoospermic," *Andrologia*, vol. 54, no. 1, p. e14257, 2022, doi: 10.1111/and.14257.
86. Z. Zhang et al., "The association between mobile phone use and semen quality: A cross-sectional study," *Environmental Pollution*, vol. 305, p. 119225, 2022.
87. I. Volkova, A. Mishra, S. Singh y A. Chaturvedi, "Effects of 42.25 GHz millimeter-wave irradiation on motility and chromatin status of human cryopreserved spermatozoa," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 15, p. 2322, 2014.
88. Russell, C. L. (2018). *5G wireless telecommunications expansion: Public health and environmental implications*. *Environmental Research*, 165, 484–495. DOI: 10.1016/j.envres.2018.01.016
89. B. J. Houston et al., "Whole-body exposures to radiofrequency-electromagnetic energy can cause DNA damage in mouse spermatozoa via an oxidative mechanism," *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, Art. no. 17478, Nov. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-53983-9.
90. S. M. Maluin, K. Osman, F. H. F. Jaffar, and S. F. Ibrahim, "Effect of Radiation Emitted by Wireless Devices on Male Reproductive Hormones: A Systematic Review," *Front. Physiol.*, vol. 12, p. 732420, Sep. 2021, doi: 10.3389/fphys..2021.732420.
91. N. N. Shahin, S. M. Abdelkader, and M. A. Elhady, "The protective role of spermine against male reproductive aberrations induced by exposure to electromagnetic field," *Toxicol. Appl. Pharmacol.*, vol. 370, pp. 117–130, May 2019, doi: 10.1016/j.taap.2019.03.009.
92. M. Çetkin, H. Kızılkın, and R. Demir, "Quantitative changes in testicular structure and function in rat exposed to mobile phone radiation," *Andrologia*, vol. 49, no. 1, p. e12761, 2017.
93. A. B. Miller, M. E. Sears, L. L. Morgan, D. L. Davis, L. Hardell, M. Oremus, and C. L. Soskolne, "Risks to health and well-being from radio-frequency radiation emitted by cell phones and other wireless devices," *Front. Public Health*, vol. 7, p. 223, 2019, doi: 10.3389/fpubh.2019.00223.
94. E. Egea-López, A. Martínez-Sala, J. Vales-Alonso, J. García-Haro, y J. Malgosa-Sanahuja, "Wireless communications deployment in industry: a review of issues, options and technologies," *Computers in Industry*, vol. 56, no. 1, pp. 29–53, 2005, doi: 10.1016/j.compind.2004.10.001.

95. E. M. Assefa and S. M. Abdu, "Histopathologic effects of mobile phone radiation exposure on the testes and sperm parameters: a systematic literature review of animal studies," *Front. Reprod. Health*, vol. 6, p. 1515166, 2024. doi: 10.3389/frph.2024.1515166.
96. M. Tas, S. Dasdag, M. Z. Akdag, U. Cirit, K. Yegin, U. Seker, y L. B. Eren, "Long-term effects of 900 MHz radiofrequency radiation emitted from mobile phone on testicular tissue and epididymal semen quality," *Electromagnetic Biology and Medicine*, vol. 33, no. 3, pp. 216–222, 2013, doi: 10.3109/15368378.2013.801850.
97. M. Sepehrmanesh, M. H. Saeb, S. Nazifi, H. R. Kazemi, and S. M. J. Mortazavi, "Impact of 900 MHz electromagnetic field exposure on main male reproductive hormone levels," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 58, no. 6, pp. 1657–1663, Aug. 2014. doi: 10.1007/s00484-013-0771-7.
98. K. Kesari et al., "Effects of radiofrequency electromagnetic wave exposure on male fertility: A review of mechanistic studies," *Reprod. Toxicol.*, vol. 71, pp. 33–45, 2017..
99. R. J. Aitken et al., "Biological and clinical significance of DNA damage in the male germ line," *Int. J. Androl.*, vol. 32, pp. 46–56, 2009, doi: 10.1111/j.1365-2605.2008.00943. X.
100. M. A. Bhat, "Effects on testis of human being with specific absorption rate (SAR) of mobile phone," *Sch. J. Eng. Tech.*, vol. 5, pp. 599–601, 2017.
101. D. R. Franken y S. Oehninger, "Semen analysis and sperm function testing," *Asian Journal of Andrology*, vol. 14, no. 1, pp. 6–13, Jan. 2012, doi: 10.1038/aja.2011.58.
102. H. R. Momeni, M. H. Abnosi, and N. Eskandari, "Quantitative evaluation of human sperm viability using MTT assay: A laboratory study," *International Journal of Reproductive BioMedicine*, vol. 18, no. 11, pp. 983–988, Nov. 2020, doi: 10.18502/ijrm.v13i11.7966
103. M. Aydin, G. Turk, M. Yuksel, A. Cevik, A. M. Apaydin, y S. Yilmaz, "Effect of electromagnetic fields on the sperm characteristics and histopathology status of testis in rats," *Electromagn. Biol. Med.*, vol. 26, no. 3, pp. 177–186, 2007



SEDE CENTRAL
FORMULARIO DE ENTREGA DE PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

Nota: Llenar este formulario a máquina de escribir. Entregar este formulario junto con el Proyecto Final de Graduación y los Paz y Salvo

Por este medio, notifico que el Proyecto
 Titulado: "IMPACTO DE LA EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS POR LOS
 TELÉFONOS MÓVILES EN LA MOTILIDAD ESPERMÁTICA"

Correspondiente al estudiante: Jendall Antonio Barria Quiñones.
 De la carrera: Licenciatura en Ingeniería Biomédica e Instrumentación.
 Doy fe que he revisado y autorizado la entrega del Proyecto Final de Graduación (Documento Final),
 a Secretaría Académica, por reunir los requisitos y acatamientos exigidos por la Universidad Latina
 de Panamá y sugiere se le asigne la fecha para su defensa oral (sustentación).

Autorización del Director del Proyecto Final de Graduación:

Nombre del Profesor Director: Dr. Ernesto Ibarra

Firma de Autorización:

Teléfono: 6245-0000

Autorización del Profesor responsable del Curso Proyecto Final de Graduación:

Nombre del Profesor: Prof. Alfredo Lescher

Firma de Autorización:

Teléfono: 6126-3467

En caso de revisión de un Profesor de Español

Notifico que doy fe que el documento cumple satisfactoriamente con todos los requisitos formales de
 ortografía y de redacción exigidos por el idioma español.

Nombre del Profesor de Español: Prof. Raquel Escala

Autorización: _____

Firma del Estudiante _____ Fecha de Entrega 07 de agosto del 2025

Recibido por _____ Fecha _____



ANEXO 4

Carta de revisión del Profesor de Español

Panamá, 05 de agosto del 2025

Señores:

UNIVERSIDAD LATINA DE PANAMÁ

E. S. D.

Estimados Señores:

La suscrita Raquel Escala con cédula de identidad personal 8-376-39 notifico haber revisado por solicitud del estudiante Jendall Antonio Barria Quiñones, con cédula de identidad personal número 8-914-283, el proyecto final de graduación titulado “Impacto de la exposición a campos electromagnéticos por los teléfonos móviles en la motilidad espermática” y a su vez doy fe de que el documento cumple satisfactoriamente con todos los requisitos formales de ortografía y de redacción exigidos por el idioma español.

Atentamente,

REPÚBLICA DE PANAMÁ
TRIBUNAL ELECTORAL

Raquel Elida
Escala Diaz

NOMBRE USUAL:
FECHA DE NACIMIENTO: 27-MAY-1971
LUGAR DE NACIMIENTO: PANAMÁ, PANAMÁ
SEXO: F
EXPEDIDA: 06-JUN-2019

TIPO DE SANGRE:
EXPIRA: 06-JUN-2029

376-39



UNIVERSIDAD DE PANAMA

LA FACULTAD DE

Humanidades

EN VIRTUD DE LA POTESTAD QUE LE CONFIEREN LA LEY Y EL ESTATUTO UNIVERSITARIO,
HACE CONSTAR QUE

Raquel Elida Escala Díaz

HA TERMINADO LOS ESTUDIOS Y CUMPLIDO CON LOS REQUISITOS
QUE LE HACEN ACREEDOR AL TITULO DE

**Licenciada en Humanidades
con Especialización en Español**

Y EN CONSECUENCIA, SE LE CONCEDE TAL GRADO CON TODOS LOS DERECHOS,
HONORES Y PRIVILEGIOS RESPECTIVOS, EN TESTIMONIO DE LO CUAL SE LE EXPIDE
ESTE DIPLOMA EN LA CIUDAD DE PANAMA A LOS **tres**
DIAS DEL MES DE **Marzo** DE MIL NOVECIENTOS **noventa y siete**



Secretaría General

Diploma 54156

Identificación Personal 6-378-58



Decano



Rector



