

Determinación del efecto de campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas sobre la espermatogénesis en ratones

Determination of the effects of magnetic fields of extremely low frequencies on spermatogenesis in mice

Víctor Cruz O.¹, Martha Valdivia C.²

RECIBIDO: 16/05/2016 - APROBADO: 30/06/2016

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue investigar los efectos de la exposición crónica a los campos magnéticos (CM) de niveles ambientales existentes en la ciudad de Lima sobre la salud reproductiva de ratones machos. En primer lugar se revisó la información sobre los niveles de los campos magnéticos de líneas de energía eléctrica medidos en el Perú y otros países así como los límites de exposición de la Comisión Internacional de Protección contra los Campos Electromagnéticos (ICNIRP) para poder definir los niveles a los cuales se expondría al material biológico. La muestra biológica fueron 32 ratones machos (*Mus musculus*) de 10 semanas de edad, de la cepa Balb C, con los cuales se conformaron cuatro grupos experimentales de 8 ratones cada uno incluyendo un grupo control, uno con exposición ficticia (sham), un grupo expuestos a CM de 50 μ T y otro expuesto a 500 μ T, los cuales fueron expuestos durante un ciclo espermatogénico (35 días). Se evaluaron el peso de los testículos y epididimos. El recuento espermático se realizó en una cámara de Neubauer (hemocitometro) y la movilidad espermática de acuerdo al método recomendado por la Organización Mundial de la Salud.

El sistema de exposición se basó en 4 bobinas de Helmholtz midiéndose el CM de cada bobina mediante el analizador de campos electromagnéticos Narda EFA 300 y el monitoreo durante la ejecución del estudio se realizó cada dos semanas utilizándose el mismo analizador. Los resultados fueron evaluados usando el paquete estadístico SPSS 22 para Windows. Mediante las pruebas de Shapiro- Wilk y Leneve para la normalidad de los datos y las pruebas Anova y Kruskal Wallis (según los datos tuvieron distribución normal o no) para conocer si los grupos de cualquier variable tenían medias iguales o no. Se demostró que en términos generales la exposición crónica a los CM con niveles existentes en lugares cercanos a las líneas de alta tensión en la ciudad de Lima no afectó el peso de los órganos reproductivos, pero sí afectó la concentración y la movilidad espermática. En conclusión el estudio demostró que para los niveles de exposición crónica a CM evaluados si hay afectación de la salud reproductiva de los ratones Balb C macho expuestos.

Palabras clave: Campo magnético, fertilidad masculina, redes de energía eléctrica, campos de energía eléctrica, concentración espermática, movilidad espermática.

ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the reproductive health effects on male mice from magnetic fields (MF) whose levels were the same as environmental levels in Lima city. First of all, it was revised not only the data on MF levels from measurements carried out in Peru and abroad but also the limits of the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) in order to define the exposure levels for the biological material. The biological sample were 32 male BalbC mice ten weeks old (*Mus musculus*) from the animal breeding laboratory of the Universidad Cayetano Heredia which were prepared at the animal breeding laboratory of the Faculty of Biological Sciences of the UNMSM which were divided in eight groups of eight mice each group including one control group, one sham groups, one group which was exposed to 50 μ T and one which was exposed to

1 Alumno de Doctorado en Ciencias Ambientales de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica.

2 Profesora principal de la Facultad de Ciencias Biológicas. E-mail: mvaldiviac@unmsm.edu.pe

550 μT , which were exposed during a spermatogenic cycle (35 days). They were assessed the weight of testis and epididymis. Spermatic count was carried out inside a Neubauer camera (hemocitometre), spermatic motility was measured according to the method recommended by the World Health Organization (WHO). The exposure system was based on 04 Helmholtz coils measuring the MF from each coil using an electromagnetic field analyser Narda EFA 300 and the monitoring during the study was performed every two weeks with the same analyser. The results were processed using the statistical software for Windows carrying out the Shapiro-Wilk and Leneve tests in order to know if the data is normally distributed or not and the Anova and Kruskal Wallis tests (whether the data were normally distributed or not) to know if the exposure group for any variable have the same mean or not. In general the results showed that chronic exposure to MF with the same levels of the existing ones near high power lines in Lima city did not affected reproductive organ weights but did affect the sperm count and sperm motility. In conclusion the study showed for chronic exposure to MF at evaluated levels there was effects on reproductive health of exposed male Balb C mice.

Keywords: Magnetic field, male fertility, power energy networks, power energy fields, sperm concentration, sperm motility.

I. INTRODUCCIÓN

Las redes de energía eléctrica en los últimos años han experimentado un crecimiento sostenido en el Perú y en el mundo.

De acuerdo al Ministerio de Energía y Minas al año 2009 la potencia instalada era 7986 MW para una demanda máxima de 4322 MW, con una producción eléctrica 32 945 GWh y 4.9 millones de clientes que totalizaron una demanda de energía de 27087 GWh. Asimismo al 2009 se tenían 5714 km. de líneas de transmisión de 220 kV y 4057 km de líneas de 138 kV (MINEM, 2009).

En Sudamérica, el Perú es el país que ha tenido la más alta tasa de crecimiento anual (PNB mayor a 5 %) en la última década (The Economist, 2011). El vertiginoso y sostenido crecimiento de la economía que impulsó el rápido incremento de la demanda por parte de la minería, la industria de la fundición y la producción de cemento así como el bajo precio del gas natural han sido los factores principales de crecimiento de la generación de electricidad y de las redes de energía eléctrica en su conjunto (CEE-IPAE, 2009).

De acuerdo a las perspectivas de crecimiento económico del Perú considerando desde escenarios pesimistas hasta escenarios optimistas la demanda de energía en el 2019 fluctuará entre 5800 a 7000 GWh. Se estima que para el escenario optimista la potencia instalada en el 2019 debería ser de 9975 MW y al 2014 se deberían tener 2438 km de nuevas líneas de transmisión de 500 kV, 2815 de líneas de 220 kV y 118 km de líneas de 138 kV (MINEM, 2009). Es así que en junio de 2012 se registró una demanda de potencia instalada de 5030 MW con una producción de energía eléctrica de 3349 GWh que está en concordancia con la prospectiva señalada (MINEM, 2012).

El acelerado crecimiento de las redes de energía eléctrica es necesario y representa uno de los indicadores más importantes del progreso de las naciones; sin embargo, conlleva ciertos impactos ambientales entre los cuales se encuentran la generación de radiaciones no ionizantes de campos electromagnéticos. Dichas radiaciones han generado diversas preocupaciones en el Perú y en el mundo (Discovery Salud, 2006), por los posibles efectos sobre la salud de las personas.

En el Perú en el 2010 se iniciaron los estudios para la instalación de las líneas de transmisión eléctrica de 500 kV, los cuales se vieron obstaculizados por la oposición de la población debido entre otras causas a temores por posibles efectos sobre la salud de las personas.

Para el Perú es una necesidad la implementación de las nuevas redes de energía eléctrica que soporten el desarrollo sostenible del país. Por ello es sumamente importante realizar estudios para garantizar que la salud de la población no sea afectada por los campos electromagnéticos de dichas redes.

Para demostrar la existencia de efectos sobre la salud de las personas es esencial realizar un conjunto de estudios en distintos campos de investigación, los cuales aborden diversos aspectos del problema. Entre los principales se pueden señalar los estudios in vitro que se realizan sobre células, los estudios in vivo realizados sobre animales, los estudios epidemiológicos realizados sobre poblaciones en seres humanos.

Los estudios en animales están más estrechamente relacionados con las condiciones reales y proporcionan resultados que son más directamente pertinentes para determinar los niveles de exposición seguros para las personas y frecuentemente estudian diversas intensidades de los campos electromagnéticos para investigar las relaciones entre dosis y respuesta (OMS, 2012).

La base de datos más importante (EMF-Portal, 2016) muestra que a la fecha existen pocos estudios sobre la afectación de la salud reproductiva producto de la exposición a los campos electromagnéticos ELF, los cuales dan resultados contradictorios y que en conjunto representan una evidencia no adecuada para los efectos en el desarrollo y la reproducción.

Por lo tanto, se necesita elaborar estudios más cuidadosos y detallados para determinar si la exposición a ELF puede inducir efectos adversos sobre la espermatogénesis y la capacidad reproductiva.

De acuerdo a estas consideraciones el objetivo de este estudio es evaluar los potenciales efectos dañinos sobre la salud de ratones macho proveniente de la exposición a campos magnéticos de 60 Hz de 50 y 550 μT aplicados durante un ciclo spermatogénico completo (35 días).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Revisión de literatura de niveles típicos de los campos electromagnéticos ambientales cerca de las líneas energía eléctrica Lima

En el caso de las líneas aéreas para definir los niveles típicos de los campos electromagnéticos cerca de las líneas de energía eléctrica se revisaron los estudios realizados por el

INICTEL y el INICTEL-UNI, así como otros documentos encontrados a nivel internacional sobre la medición de niveles en la cercanía de líneas de transmisión (INICTEL, 2002; INICTEL, 2003; INICTEL, 2005).

El Instituto Nacional de Investigación y Capacitación de Telecomunicaciones (INICTEL) con financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC) en el año 2002 realizó el estudio “Evaluación de las radiaciones electromagnéticas no ionizantes producidas por los servicios de distribución de energía eléctrica” habiéndose realizado mediciones en 115 puntos en la ciudad de Lima y 218 en el interior del país. Asimismo, en el año 2003, el INICTEL realizó como parte del Diagnóstico Nacional de las Radiaciones No Ionizantes de las Redes de Energía Eléctrica el estudio “Medición de radiaciones electromagnéticas en zonas pobladas cercanas a líneas de transmisión eléctrica en la ciudad de Lima” el cual implicó la medición en 779 puntos de medición en la ciudad de Lima. A partir de las mediciones realizadas en Lima por estos estudios se obtienen las siguientes conclusiones: Finalmente los años 2004-2005 INICTEL realizó el estudio “Evaluación de los efectos de las radiaciones electromagnéticas sobre la calidad de vida de los trabajadores y las poblaciones cercanas a líneas de transmisión y distribución eléctrica”, el cual incluyó la realización de mediciones de la intensidad de campo eléctrico y de la inducción magnética en zonas pobladas cercanas a líneas de transmisión eléctrica y subestaciones en las ciudades de Arequipa Huancayo, Ica y Trujillo.

Para las líneas subterráneas no se cuenta con mediciones realizadas a nivel nacional por lo que se ha tomado en cuenta la información que presenta la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2007) sobre las mediciones realizadas en Estados Unidos y el Reino Unido.

2.2 Diseño del sistema de exposición

Para dimensionar adecuadamente el sistema de exposición se tomó en cuenta la información obtenida de la evaluación de campos magnéticos en el Perú y el mundo incluyendo líneas aéreas y subterráneas y los límites ICNIRP (2010) y aplicando la teoría correspondiente (Trout, 1988; De Troye, 1994; Gyawali, 2008) fueron implementadas 4 bobinas de Helmholtz (Cruz, Nuñez, Varela, Ayala, Tafur, Luna y Quispe) midiéndose experimentalmente el campo de cada bobina mediante el analizador de campos electromagnéticos Narda EFA 300.

2.3 Diseño del estudio biológico

Etapas previas a la exposición: como fue la realización del acondicionamiento de los animales, el diseño y acondicionamiento de los generadores del campo magnético, el acondicionamiento y puesta a punto del bioterio, y el acondicionamiento y puesta a punto de los equipos y dispositivos a utilizar.

Formación de los grupos experimentales

Experimento propiamente dicho: que consistió en la

evaluación de los parámetros espermáticos y el monitoreo de los campos magnéticos.

2.4 Muestra biológica

Los animales empleados para este estudio fueron ratones machos (N=8) (*Mus musculus*) de 10 semanas de edad, de la cepa Balb C, provenientes del Bioterio de la Universidad Cayetano Heredia y acondicionados en el Bioterio de la Facultad de Ciencias Biológicas de la UNMSM, mantenidos en condiciones fisiológicas: temperatura de 25 °C a 27 °C, con libre acceso a la comida balanceada (Purina-Perú), agua ad libitum y un fotoperiodo de 14/10 horas luz/oscuridad.

2.4.1 Consideraciones éticas

El estudio realizado contó con la aprobación del Comité de Bioética de la Facultad de Ciencias Biológicas. Durante el tratamiento con ondas electromagnéticas, la administración de alimentos y limpieza de las jaulas fueron realizadas evitando el sufrimiento y estrés de los animales basándonos en los principios y recomendaciones para el uso de animales de experimentación (Barassi, Benavides y Ceccarelli, 1996; CCAC, 1993; Cuesta y Sánchez, 2007).

2.4.2 Grupos Experimentales

Se conformaron cuatro grupos: un grupo control, un grupo con exposición ficticia (sham), un grupo expuesto a campo magnético de baja intensidad del orden de 50µT y un grupo expuesto a campo magnético de alta intensidad del orden de 550µT.

Cada grupo de ratones fue incluido en su respectivo tratamiento durante 35 días, es decir, durante un ciclo espermatogénico completo (Franca, Ogawa, Avarbock, Brinster y Russell, 1999), luego del cual se registró el peso corporal y los animales fueron eutanizados por dislocación cervical, registrándose el peso de los testículos y epidídimos. Se evaluó la concentración y movilidad espermática.

2.4.3 Obtención de los espermatozoides

Se diseccionó la cola del epidídimo, se lavó con PBS (pH 7.4) y en 0.5ml del medio Flushing (MediCult®, Copenhagen, Dinamarca) se realizaron varias incisiones permitiendo la liberación de los espermatozoides durante 10 minutos a 37 °C.

2.5 Evaluación de la Movilidad y concentración espermática

Se consideró que un espermatozoide presentaba Movilidad Progresiva (MP), cuando se desplazaba, Movilidad no Progresiva (MNP) a aquellos que no se desplazaban y solo tenían un movimiento *in situ*, e Inmóviles (I), los que no presentaban ningún tipo de movimiento (OMS, 2010). El recuento espermático se realizó en una cámara de Neubauer.

2.6 Monitoreo del campo magnético

Se realizaron mediciones de campo magnético por lo menos cada dos semanas para lo cual se utilizó un Analizador de Campo Electromagnético de baja frecuencia EFA 300 de Narda encontrándose que el nivel de los ratones expuestos fue aproximadamente $550\mu\text{T}$ para el nivel alto y aproximadamente $50\mu\text{T}$ para el nivel bajo, en el caso de los grupos control y sham a exposición estuvo en el orden de 300 nT ($0.3\mu\text{T}$) que en términos prácticos se puede entender como un nivel de $0\mu\text{T}$.

El Analizador de Campo Electromagnético consta de un módulo principal de procesamiento y dos sensores independientes, uno para campo eléctrico y otro para campo magnético. Cada sensor, de características isotrópicas, toma muestras de campo electromagnético en los tres ejes que luego son procesadas digitalmente en el equipo. Sus certificados de calibración se encuentran vigentes y han sido emitidos por los Laboratorios de NARDA en Alemania garantizando la exactitud y calidad de las mediciones realizadas tanto de campo eléctrico como campo magnético.

2.7 Análisis Estadístico

Los resultados fueron evaluados usando el paquete estadístico SPSS 22 para Windows. Se realizó el test de ShapiroWilk y Leneve para comprobar normalidad y homocedasticidad de los datos. Las diferencias entre los grupos con distribución normal se analizaron mediante la prueba Anova y se usaron los post hoc de Tuckey (Pesos, movilidad y concentración espermática) para encontrar las relaciones entre los diferentes grupos expuestos. En el caso de las variables con distribución no normal, las diferencias entre los grupos se evaluaron mediante el test de Kruskal Wallis. Los resultados son expresados como media \pm EE (error estándar), $n=8$. Un valor de $p<0.05$ fue considerado estadísticamente significativo.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Revisión de literatura de niveles típicos de los campos electromagnéticos ambientales cerca de las líneas energía eléctrica Lima

3.1.1 Líneas Aéreas

Se han realizado varias campañas de medición de los campos electromagnéticos de líneas aéreas a nivel nacional.

El Instituto Nacional de Investigación y Capacitación de Telecomunicaciones (INICTEL) con financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC) en el año 2002 realizó el estudio "Evaluación de las Radiaciones Electromagnéticas No Ionizantes Producidas por los Servicios de Distribución de Energía Eléctrica" habiéndose realizado mediciones en 115 puntos en la ciudad de Lima y 218 en el interior del país. Asimismo en el año 2003 el INICTEL realizó como parte del Diagnostico Nacional de las Radiaciones No Ionizantes de las Redes de Energía Eléctrica el estudio "Medición de radiaciones electromagnéticas en zonas pobladas cercanas

a líneas de transmisión eléctrica en la ciudad de Lima" el cual implicó la medición en 779 puntos de medición en la ciudad de Lima. A partir de las mediciones realizadas en Lima por estos estudios se obtienen las siguientes conclusiones:

El valor de campo magnético promedio está en el orden de $1\mu\text{T}$ y no se encontraron casos en los cuales se sobrepase el Límite Máximo Permissible (ICNIRP 1998) de Campo Magnético. El valor máximo de campo magnético encontrado fue de $8.8140\mu\text{T}$ encontrado bajo una línea de 220 kV . Para líneas de 60 kV el valor máximo fue $5.1390\mu\text{T}$ medido debajo de las líneas y en el caso de las líneas de 10 kV fue $6.414\mu\text{T}$ a una distancia horizontal de 1.3m de las líneas en el tercer piso de una vivienda.

En la figura 1 se muestran los valores de las mediciones de campo magnético para líneas de 60 kV en función de la distancia y en la figura 2 se muestra los valores de las mediciones de campo magnético realizadas para líneas de 220 kV en el 2003. (INICTEL, 2003).

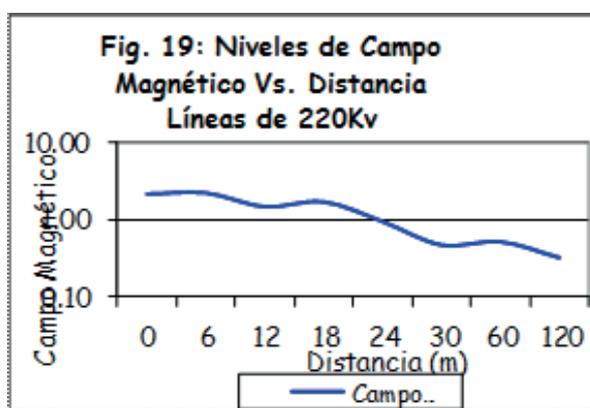


Figura N.º 1. Mediciones de campo magnético según la distancia para líneas de 220 kV (INICTEL, 2003).

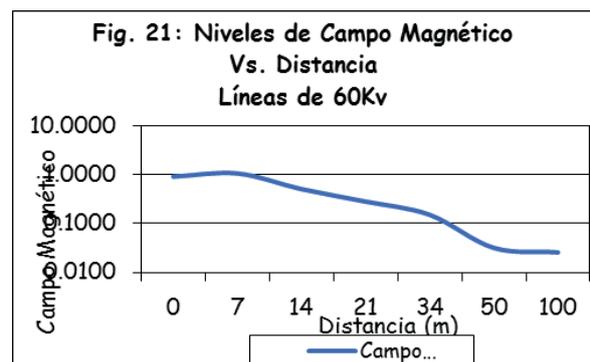


Figura N.º 2. Estadísticas de las mediciones de campo magnético para líneas de 60 kV (INICTEL, 2003).

Tal como se puede observar para líneas aéreas de 220 kV los valores máximos de los campos magnéticos son del orden de $8\mu\text{T}$, lo cual es coherente con las mediciones realizadas a nivel internacional realizadas en Estados Unidos y presentadas por el National Institute of Environmental Health Sciences (NIEHS), tal como se muestra en la Tabla 1 (OMS, 2007).

Tabla N.º 1. Campos magnéticos típicos en μT para líneas de transmisión aéreas a

Tipo de línea	Tipo de utilización	Máximo sobre la franja de servidumbre	Distancia desde las líneas			
			15 m	30 m	61 m	91 m
230 kV	Promedio	5.8	2.0	0.7	0.18	0.08
	Pico	11.8	4.0	1.5	0.36	0.16
500 kV	Promedio	8.7	2.9	1.3	0.32	0.14
	Pico	18.3	6.2	2.7	0.67	0.30

Fuente: NIEHS, 1995.

3.3.2. Líneas Subterráneas

En el caso de las líneas subterráneas no se han realizado mediciones de los campos electromagnéticos a nivel nacional, por eso se tomarán como referencia las mediciones realizadas en el Reino Unido por National Grid tal como se muestra en la Tabla 2 (OMS, 2007).

Tabla N.º 2. Campos magnéticos para cables subterráneos calculados a 1 m sobre el nivel del suelo

Voltaje	Descripción	Ubicación	Carga	Campo magnético en μT a la distancia desde el centro de la línea			
				0 m	5 m	10 m	20 m
400 kV y 275 kV	Hundido	Espaciamiento 0.13 m profundidad 0.3 m	Máximo típico	83.30 20.83	7.01 1.75	1.82 0.46	0.46 0.12
	Enterrado directamente	Espaciamiento 0.5 m 0.9 m profundidad	Máximo típico	96.17 24.06	13.05 3.26	3.58 0.90	0.92 0.23

Fuente: NationalGrid, 2007^a

Se puede observar que las líneas de 275 kV tienen un campo magnético en el orden de $100\mu\text{T}$.

3.2. Sistemas de exposición a campos magnéticos basados en bobinas de Helmholtz

Los sistemas de exposición más simples están conformados por las bobinas de Helmholtz acondicionadas con soportes adecuados al tamaño de las jaulas para los ratones.

Para poder dimensionar adecuadamente el sistema de exposición a partir de la información obtenida de la evaluación de campos magnéticos en el Perú y el mundo incluyendo líneas aéreas y subterráneas y tomando en cuenta los límites ICNIRP (1998) para exposición poblacional a los campos magnéticos se escogieron dos niveles de exposición de 50 y 550 μT , por debajo y por encima del límites poblacional respectivamente.

En base a la teoría de las bobinas de Helmholtz se procedió a la construcción de la bobina y de los transformadores asociados a ellas para los voltajes aplicados de 2.5V, 4.5V, 22.5V y 35V (Cruz, V., Nuñez, T., Varela, A., Ayala, A., Tafur, J., Luna, L. y Quispe, R; 2012).

Una vez implementadas las bobinas de Helmholtz se midió experimentalmente el campo de cada bobina mediante el analizador de campos electromagnéticos Narda EFA 300.

El sistema de exposición conformado por las 4 bobinas de Helmholtz construidas se aprecian en la figura 3 el cual toma en cuenta los aspectos éticos para la experimentación con animales (figura 4) (Barassi, Benavides y Ceccarelli, 1996; CCAC, 1993; Cuesta y Sánchez, 2007).



Figura N.º 3. Sistema de exposición a campos magnéticos.



Figura N.º 4 y Figura N.º 9. Acondicionamiento de los ratones en las bobinas de Helmholtz.

3.3. Revisión de la literatura de estudios biológicos

En general los estudios sobre la alteración de las funciones reproductivas y de la espermatogénesis han dado resultados contradictorios. Algunos estudios mostraron que la exposición a CEM- ELF no indujo efecto adverso sobre la espermatogénesis y la capacidad reproductiva en experimentos con humanos y animales (Lundsberg, Bracken y Belanger, 1995; Kowalczyk, Robbins, Thomas y Saunders, 1995; Ryan, Symanski, Pomeranz, Johnson,

Gauger y McCormick, 1999; Heredia, Caballero, Rodríguez, Ramos, G y Rodríguez, 2004). Otros estudios conducidos por otros investigadores mostraron un claro daño sobre la espermatogénesis (OMS, 1992; De Vita, Cavallo, Raganella, Eleuteri, Grollino y Calugi, 1995; Lee, J.S., Ahn, Jung, Kim y Lee, S.K., 2004). Además se han realizado una variedad de estudios sobre efectos teratológicos incluyendo pérdida fetal y malformaciones congénitas (Nordstrom, Birke y Gustavsson, 1983; Wertheimer y Leeper, 1989; Juutilainen, Matilainen, Saarikoski, Laara y Suonio, 1993) con el mismo tipo de resultados.

Por lo tanto, se necesita elaborar estudios más cuidadosos y detallados para determinar si la exposición a ELF puede inducir efectos adversos sobre la espermatogénesis y la capacidad reproductiva,

Las revisiones más importantes publicadas en los últimos tiempos sobre los posibles efectos en la salud de los campos electromagnéticos de frecuencias extremadamente bajas la Revisión IEEE (2002), la Revisión ICNIRP (2003) y los Criterios de Salud Ambiental 238 de la OMS (2007) muestran que a la fecha existen pocos estudios sobre la afectación de la salud reproductiva producto de la exposición a los campos electromagnéticos ELF, los cuales dan resultados contradictorios y que en conjunto representan una evidencia no adecuada para los efectos en el desarrollo y la reproducción.

3.4. Evaluación de los parámetros biológicos

En la Tabla 3 se resumen las características físicas de los órganos evaluados para los animales sacrificados a los 35 días.

Tabla N.º 3. Características físicas de los grupos experimentales evaluados a los 35 días.

	Control	Sham	50 μ T	550 μ T
TEST DER (g)	0.1044 \pm 0.0178	0.0970 \pm 0.0279	0.1334 \pm 0.0257	0.1457 \pm 0.0429
TEST IZQ (g)	0.1009 \pm 0.0249	0.0976 \pm 0.0230	0.1283 \pm 0.0206	0.1188 \pm 0.0202
COL EPID DER (g)	0.0150 \pm 0.0029	0.0178 \pm 0.0043	0.0147 \pm 0.0024	0.0144 \pm 0.0024
COL EPID IZQ (g)	0.0130 \pm 0.0012	0.0200 \pm 0.0043	0.0140 \pm 0.0045	0.0131 \pm 0.0024

Se comprobó la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro- Wilk encontrando que para los diferentes órganos la distribución de los pesos con respecto a la exposición siguen una distribución normal es por ello que luego se aplicó la prueba ANOVA encontrándose que para el testículo derecho, la cola de epidídimo derecho y el testículo izquierdo las medias son iguales para todos los grupos de exposición, lo que significa que con un nivel de confiabilidad del 95 % los pesos de estos órganos para la exposición durante 35 días no se ve afectada, en el caso de la cola de epidídimo izquierdo por lo menos una media de los grupos es diferente, es decir, con un nivel de confiabilidad del 95% el peso de la cola del epidídimo izquierdo dependió del nivel de exposición. En términos

generales se podría decir que la exposición a los CM de 35 días no afecta el peso de los órganos reproductivos.

3.5. Parámetros espermáticos

En la Tabla 4 se resumen los parámetros espermáticos evaluados para los animales sacrificados a los 35 días y en las figuras 27-29 se muestran de manera comparativa la relación entre los pesos de los grupos experimentales evaluados a 35 días.

Tabla N.º 4. Parámetros espermáticos de los grupos experimentales evaluados a los 35 días.

	Control	Sham	50 μ T	550 μ T
Movilidad prog (%)	59.84 \pm 6.96	49.2 \pm 22.73	17.57 \pm 13.30	17.84 \pm 11.95
Concentración (espermatozoides/ml)	57.4 \pm 19.6	58.4 \pm 14.09	18.38 \pm 6.44	17.34 \pm 13.07

3.6. Movilidad espermática

La movilidad espermática progresiva de los grupos expuestos a campos magnéticos de 50 y 550 μ T fueron 17.57 \pm 13.30 y 17.84 \pm 11.95 respectivamente significativamente mucho más bajas con respecto al grupo control 59.84 \pm 6.96; $p < 0.05$ y al grupo expuesto ficticiamente (sham) 49.2 \pm 22.73; $p < 0.05$ (ver figura 5).

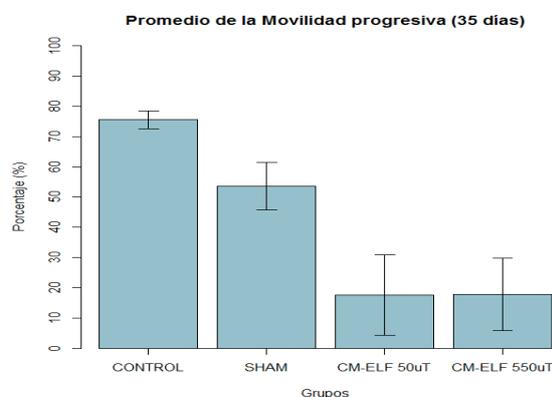


Figura N.º 5. Movilidad progresiva espermática - 35 días.

Se comprobó la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro- Wilk encontrando que la distribución de la concentración espermática con respecto a la exposición siguen una distribución normal es por ello que luego se aplicó la prueba ANOVA encontrándose las medias no son iguales para todos los grupos de exposición lo que significa que con un nivel de confiabilidad del 95 % la concentración espermática para la exposición durante 35 días depende de la exposición a los CM. En términos generales se puede decir que el nivel de la exposición a CM para periodos de exposición de 35 días afecta la concentración espermática.

3.7. Cuenta espermática

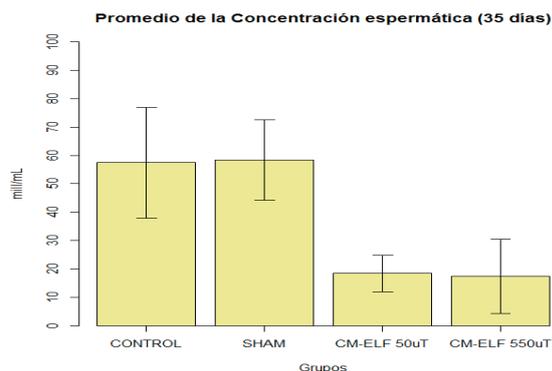


Figura N.º 6. Concentración espermática - 35 días.

Se comprobó la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro-Wilk encontrando que la distribución de la movilidad espermática con respecto a la exposición no sigue una distribución normal es por ello que luego se aplicó la prueba KRUSKAL-WALLIS encontrándose las medias no son iguales para todos los grupos de exposición lo que significa que con un nivel de confiabilidad del 95 % la movilidad espermática para la exposición durante 35 días depende de la exposición a los CM. En términos generales se puede decir que el nivel de la exposición a CM para periodos de exposición de 35 días afecta la movilidad espermática.

3.8. Monitoreo de intensidad de campo magnético

Se realizaron mediciones campo magnético cada dos semanas en encontrándose en promedio 550 μ T para los ratones expuestos al nivel CM alto y 50 μ T para el nivel de CM bajo, en el caso de los controles y los sham el campo de fondo fue del orden de las centenas de nT.

IV. CONCLUSIONES

La exposición de ratones BALB/c durante un ciclo completo a ELF-MF no afecta los pesos de los testículos y las colas de epidídimo.

La exposición a CM-ELF durante un ciclo espermatogénico completo disminuye la concentración espermática.

La exposición a CM-ELF durante un ciclo espermatogénico completo disminuye la movilidad progresiva de los espermatozoides

En general las CM-ELF afectarían la capacidad fecundante en ratones.

V. AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la UNMSM.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barassi N., Benavides, F., Ceccarelli, A. (1996). Ética en el uso de animales de experimentación. *Medicina*, 56(5 Supl 1), pp: 531-2.
- Canadian Council on Animal Care. (1993). *Guide to the Care and Use of Experimental Animals*. Ottawa: Autor.
- Cruz, V., Nuñez, T., Varela, A., Ayala, A., Tafur, J., Luna, L., Quispe, R. (2012). *Diseño e implementación de un sistema de exposición a campos magnéticos de baja frecuencia para ratones de prueba en estudios biológicos*. *Electrónica -UNMSM*, 30 pp: 3-8.
- Cuesta, L., Sánchez, K. (2007). *Aspectos éticos de la experimentación con animales*. *Bioética*, 7(2) pp: 25-27.
- De Troye, D., Chase, R. (1994). *The calculation and measurement of Helmholtz coil fields*(No. ARL-TN-35). Army Research Lab Adelphi MD.
- De Vita, R., Cavallo, D., Raganella, L., Eleuteri, P., Grollino, M.G., Calugi, A. (1995). *Effects of 50 Hz magnetic fields on mouse spermatogenesis monitored by flow cytometric analysis*. *Bioelectromagnetics*, 16 pp: 4-330.
- Discovery Salud. (2006). El peligro para la salud de los campos electromagnéticos está científicamente demostrado [sitio Web]. Madrid: Ediciones MK3 S.L. Disponible en <http://www.dsalud.com/index.php?pagina=articulo&c=391> (visitado 08-11-2012).
- Franca L., Ogawa T., Avarbock R., Brinster R., Russell L. (1998). *Germ cell genotype controls cell cycle during spermatogenesis in the rat*. *Biol Reprod* 59, pp:1371-1377.
- Gyawali, S. 2008. *Design and construction of Helmholtz coil for biomagnetic studies on soybean*. (Tesis de Maestría). University of Missouri, Columbia.
- Heredia, J.A., Caballero, D.E., Rodríguez, A.O., Ramos, G., Rodríguez, L.E. (2004). *Lack of alterations on meiotic chromosomes and morphological characteristics of male germ cells in mice exposed to a 60 Hz and 2.0 mT magnetic field*. *Bioelectromagnetics* 25, pp: 63-8.
- ICNIRP-Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones No Ionizantes. (2003). *Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (0 -100 kHz)*. Munich: Autor.
- ICNIRP - Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones No Ionizantes. (2010). *Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos variables en el tiempo (1 Hz- 100 kHz)*. *Health Phys*, 99(6), pp: 818-836.
- IEEE-Institute of Electrical and Electronic Engineers. (2002). IEEE standard for safety levels

- with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0- 3 kHz. Nueva York: IEEE; Autor.
14. INICTEL-Instituto Nacional de Investigación y Capacitación de Telecomunicaciones. (2002). *Evaluación de las Radiaciones no Ionizantes producidas por los Servicios de Distribución de Energía Eléctrica*. Lima: Autor.
 15. INICTEL-Instituto Nacional de Investigación y Capacitación de Telecomunicaciones. (2003). *Medición de Radiaciones Electromagnéticas en Zonas Pobladas Cercanas a Líneas de Transmisión Eléctrica en la Ciudad de Lima*. Lima: Autor.
 16. INICTEL-Instituto Nacional de Investigación y Capacitación de Telecomunicaciones. (2005). *Evaluación de los Efectos de las Radiaciones Electromagnética sobre la Calidad de Vida de los Trabajadores y las Poblaciones Cercanas a Líneas de Transmisión y Distribución Eléctrica*. Lima: Autor.
 17. Kowalczyk, C.I., Robbins, L., Thomas, J.M., Saunders, R.D. (1995). *Dominant lethal studies in male mice after exposure to a 50 Hz magnetic field*. *Mutat Res*, 328, pp:229-237.
 18. Juutilainen, J., Matilainen, P., Saarikoski, S., Laara, E., Suonio, S. (1993). *Early pregnancy loss and exposure to 50 Hz magnetic fields*. *Bioelectromagnetics* 14,pp :229-236.
 19. Lee, J.S., Ahn, S.S., Jung, K.C., Kim, Y.W., Lee, S.K. (2004). *Effects of 60 Hz electromagnetic field exposure on testicular germ cell apoptosis in mice*. *Asian J Androl* 6(1), pp : 29-34.
 20. Lundsberg, L.S., Bracken, M.B., Belanger, K. (1995). *Occupationally related magnetic field exposure and male subfertility*. *FertilSteril*, 63(2), pp:384-391.
 21. MINEM-Ministerio de Energía y Minas. (2009). Perú - Sector Eléctrico 2010 - Documento Promotor. Lima: Autor.
 22. MINEM-Ministerio de Energía y Minas. (2012) . Avance estadístico del subsector eléctrico -Cifras de Enero 2012. Lima: Autor.
 23. Nordstrom, S., Birke, E., Gustavsson, L. (1983). *Reproductive hazards among workers in high voltage substations*. *Bioelectromagnetics* 4(1), pp:91-101.
 24. OMS-Organización Mundial de la Salud. (1992). *Environmental Health Criteria 69: Magnetic fields*. Ginebra: Autor.
 25. OMS- Organización Mundial de la Salud. (2007). *Environmental Health Criteria 238 - Extremely low frequency fields*. España: Autor.
 26. OMS-Organización Mundial de la Salud. (2010). *Laboratory Manual for the examination and processing of human semen*. Cambridge: Cambridge University. Fifth Edition.
 27. OMS-Organización Mundial de la Salud. *researchdatabases-WHO'sdatabases -Study chart* [sitio Web]. Ginebra: Autor, Disponible en http://apps.who.int/peh-emf/research/database/studychart/studychart_generate.cfm (visitado 08-11-2012)
 28. Osinergmin ,Centro de Estudios Estratégicos de IPAE-CEE-IPAE. (2009).*Prospectiva del Sector Eléctrico 2009 - 2018*. Lima .
 29. RWTH Aachen University. EMF-Portal [Base de datos en línea]. Aachen. RWTH AachenUniversity, Disponible en <http://www.emf-portal.de/?l=e> (31-07-2015)
 30. Ryan, B.M., Symanski, R.R., Pomeranz, L.E., Johnson, T.R., Gauger, J.R., McCormick, D.L. (1999). *Multigeneration reproduction toxicity assessment of 60-Hz magnetic fields using a continuous breeding protocol in rats*. *Teratology*, 59(3),pp :156-162.
 31. The Economist. Peru's presidential election - The risk of throwing it all away. Disponible en <http://www.economist.com/node/18486281> (visitado 31-03-2011)
 32. Trout, S.R. (1988). *Use of Helmholtz coils for magnetic measurements*. *IEEE transactions on Magnetism* , 24(4), pp: 2108-2111
 33. Wertheimer, N., Leeper, E. (1989): *Fetal loss associated with two seasonal sources of electromagnetic field exposure*. *Am J Epidemiol* 129, pp:220-224.