

Efectos de los campos magnéticos de baja y extremadamente baja frecuencia sobre el desarrollo del globo ocular en el embrión de pollo

Effects of low and extremely low-frequency magnetic fields on eye development in chick embryo

Departamento de Ciencias Morfológicas
Facultad de Medicina
Universidad de Granada

Casanova Llivina J. A.
Roda Murillo O.
Pascual Morenilla M. T.
López Soler M.
Robles Garzón J. F.
Guirao Piñeyro M.
Arrebola Nacle F.
Morente Chiquero J. A.
Roda Moreno J. A.

RESUMEN

Introducción: Realizamos un estudio experimental sobre los efectos que pueden provocar los CEM (campos electromagnéticos) en el desarrollo del globo ocular.

Material y método: Montamos dos bobinas de Helmholtz (generador CEM homogéneo) entre las cuales colocamos la incubadora (Masalles 65). El material biológico de estudio es el embrión de *Gallus Domesticus*, expuesto a los CEM, los 21 días de incubación.

Hacemos tres experiencias con sus correspondientes grupos controles con 1 microtesla de intensidad y frecuencias de 30, 50 y 100 Hz, haciendo extracciones en los días 15 y 21 de incubación.

Resultados: Los resultados significativos a los 15 días de incubación son: aumentos del grosor cornea en tratados con 30-50 Hz; distancia cara posterior cornea y cara anterior cristalino en tratados con 100 Hz; grosor cristalino en tratados con 50-100 Hz. El eje antero posterior globo ocular se encuentra disminuido en tratados con 100 Hz.

Los extraídos en día 21, disminuyen de manera significativa: grosor de cornea en tratados con 30 Hz; distancia cornea cristalino en tratados con 50 Hz; y grosor cristalino en tratados con 30 Hz. Mientras que el eje antero posterior globo ocular es significativamente mayor en tratados con 30 Hz.

Palabras clave: Campos magnéticos, embrión de pollo, globo ocular, desarrollo del pollo.

Casanova Llivina J A, Roda Murillo O, Pascual Morenilla M T, López Soler M, Robles Garzón J F, Guirao Piñeyro M, Arrebola Nacle F, Morente Chiquero J A, Roda Moreno J A
Efectos de los campos magnéticos de baja y extremadamente baja frecuencia sobre el desarrollo del globo ocular en el embrión de pollo
Mapfre Medicina, 2003; 14: 217-227

Correspondencia:
Universidad de Granada
Facultad de Medicina
Dpto. Ciencias Morfológicas
Avda. Madrid, 11
18071 Granada

ABSTRACT

Introduction: We performed an experimental study on the possible effects of electromagnetic fields (EMF) on eye development.

Material and methods: An incubator (Masalles 65) was placed between two Helmholtz coils (homogeneous EMF generator). The biological material studied was *Gallus Domesticus* embryo exposed to EMF during a 15 or 21-day incubation period.

Three experiments were conducted including the corresponding control groups using an intensity of 1 microtesla and frequencies of 30, 50 and 100 Hz. The embryos were extracted at 15 and 21 days of incubation.

Results: Statistically significant results at 15 days were: increases in corneal thickness in embryos treated with 30-50 Hz and in cornea-lens distance (from posterior surface of cornea to anterior surface of lens) in those treated with 50-100 Hz. The anteroposterior diameter of the eye was reduced in those treated with 100 Hz.

Significant results at 21 days were: reduction in corneal thickness in those treated with 30 Hz and in cornea-lens distance in those treated with 50 Hz; and increase in anteroposterior diameter of eye in embryos treated with 30 Hz.

Key words: Magnetic fields, chick embryo, ocular globe, chick development.

Casanova Llivina J A, Roda Murillo O, Pascual Morenilla M T, López Soler M, Robles Garzón J F, Guirao Piñeyro M, Arrebola Nacle F, Morente Chiquero J A, Roda Moreno J A
Effects of low and extremely low-frequency magnetic fields on eye development in chick embryo
Mapfre Medicina, 2003; 14: 217-227

Fecha de recepción: 28 de mayo de 2002

INTRODUCCIÓN

En nuestras sociedades actuales, el aumento del consumo de energía eléctrica, fruto del desarrollo tecnológico, ha creado un nuevo agente que incide sobre los individuos, son los campos magnéticos. Estos campos son producidos por los aparatos eléctricos, los cuales nos invaden en nuestros hogares, nos rodean en nuestras ciudades y nos hacen más fáciles y «cómodas» nuestras tareas laborales formando parte indispensable en nuestros lugares de trabajo.

Aunque los campos magnéticos de baja frecuencia se suponían exentos de riesgo para la salud, desde hace unos años se viene temiendo que dichos campos puedan ser promotores o copromotores de alteraciones en el organismo. Son muchos los datos de prensa, epidemiológicos y experimentales, que hablan de ello, expresándose a favor de la acción cancerígena que ejercen los campos magnéticos sobre todo en niños que viven habitualmente en zonas cercanas a tendidos eléctricos de alta tensión (1-7). En el personal que trabaja en oficinas hay un incremento considerable de abortos (8); o en personas que tienen una actividad profesional que los obliga a estar en relación con instrumentos que emiten ondas electromagnéticas, como conductores de trenes (9, 10), obreros de centrales eléctricas (11-14).

Tanto desde el punto de vista epidemiológico como experimental existen investigadores que hablan a favor de la nocividad de los campos magnéticos sobre la salud, mientras que otros no encuentran motivos para asociar los campos magnéticos a una agresión biológica, o no se atreven a afirmar nada ante la poca significatividad de sus resultados (15-20).

Con respecto a la acción de los campos magnéticos sobre el globo ocular, en 1980, Strzhizhovskii y cols (21) observaron que sometiendo a ratas, durante una hora a un campo magnético, presentaban una inhibición de la actividad mitótica del epitelio corneal lo cual era recuperable al suspender la exposición.

Estudios epidemiológicos realizados en obreros sometidos a campos magnéticos, que oscilaban de 112 a 190 Gauss, nos muestran como los obreros, examinados a diario, presentaron debilidad general, dolores abdominales, sed y conjuntivitis (22).

En 1985, Skrinnik (23) mostró que los campos magnéticos pulsados de 8,5 μ T y 50 Hz, con una longitud de pulso cuadrado de 0,02 seg, provocaron un aumento de la permeabilidad de la córnea.

En contraposición, Kues y cols (24), tras la exposición de conejos y primates a 10 mW/cm² y 60 GHz, no vieron alteraciones oculares algunas. Campos magnéticos de extremadamente baja frecuencia (1 Hz) provocaron una reducción de la estimulación de la corteza visual, hiperexcitabilidad de la misma (25).

Como consecuencia de los datos tan contradictorios que nos ofrece la bibliografía sobre el tema, se ha creado una gran incertidumbre respecto a la acción que pueden ejercer los campos magnéticos en el individuo. Esto nos impulsa a hacer una aportación experimental sobre la acción que pueden ejercer los campos magnéticos sobre el desarrollo embrionario del globo ocular.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para la realización de la experiencia, y siguiendo la metodología diseñada en nuestro grupo de investigación, lo primero que hemos tenido en cuenta es el diseño del mecanismo generador de campos magnéticos. Dicho dispositivo tiene que cumplir una serie de características, las más fundamentales han de ser; en primer lugar, que el dispositivo que origina los campos magnéticos ha de estar funcionando, de manera ininterrumpida, por períodos de 21 días, por lo tanto el material que lo conforma debe ser lo suficientemente robusto para evitar disfunciones o calentamientos. En segundo lugar, que el campo magnético que genera dicho dispositivo debe cubrir, lo más homogéneamente posible, una zona amplia de la incubadora donde se encuentran los huevos embrionados.

Dado el volumen ocupado por las muestras para generar el campo magnético se han elegido dos bobinas de Helmholtz, separadas una de otra por una distancia igual al radio de dichos carretes, en cuyo espacio centramos la zona de la incubadora que porta los huevos a incubar. Cada una de las bobinas tiene 500 vueltas de hilo de cobre de 2 mm de diámetro, con un diámetro de 1,40 m. La resistencia eléctrica de cada bobina es de 12 W y la autoinducción de 0,6 Hz.

Como la intensidad del campo magnético es directamente proporcional a la intensidad de la corriente necesitaríamos una elevada tensión, lo cual ha sido subsanado alimentando las bobinas a través de un circuito serie de segundo orden RLC incorporando un banco de condensadores. Los campos magnéticos se midieron con dos Teslámetros digitales: Phywe modelo 13610.93 y Chauvin-Arnoux modelo C.A 40.

Una vez conseguido el generador del campo magnético (carrete de Helmholtz), hemos sometido el material biológico a la acción experimental que dichos campos ejercen sobre el desarrollo embrionario.

El material biológico experimental elegido para llevar a cabo nuestro trabajo ha sido el embrión de *Gallus Domesticus* de la raza Leghorn HR7, cuyos huevos fertilizados fueron suministrados por la granja Santa Isabel de Córdoba.

La elección del embrión de pollo como modelo biológico de nuestra experiencia ha sido debida a que éste posee un sistema de desarrollo embrionario autosuficiente, quedando eliminado por ello cualquier inferencia adicional o interferencia materna propia de los mamíferos. Por ello, podemos analizar de forma satisfactoria cualquier acción teratógena directa sobre el sistema de desarrollo embrionario, en nuestro caso se trata de observar la acción directa que ejercen los campos electromagnéticos sobre el proceso de desarrollo ocular del embrión durante todo el proceso de incubación.

Aparte de las razones anteriormente expuestas, podemos sumar las que derivan del hecho de que el grupo de investigación en el seno del cual se ha hecho la presente investigación, tiene una gran experiencia en dicho modelo biológico experimental (30 años), así como la facilidad que supone el que, en tan poco período de tiempo como es en 21 días, se pueda observar toda la embriogénesis.

Los huevos embrionados fueron introducidos en una incubadora Masalles, modelo 65, equipada con ventilación forzada y volteo automático (cada hora un volteo), a una temperatura de $37,8 \pm 0,4$ °C y a una humedad relativa del 60 al 70%. La mitad de la incubadora fue centrada entre los dos carretes de Helmholtz para que los huevos expuestos recibiesen un campo magnético homogéneo.

Para su incubación, los huevos se colocaron en bateas de material plástico y fueron sometidos a la exposición de los campos magnéticos desde el día 0 de incubación hasta el día 21. Dichos campos fueron de intensidad de 1 microtesla y frecuencias de 30, 50 y 100 Hz. Las bateas porta huevos se colocaron entre dos carretes de Helmholtz situados en paralelo a una distancia entre ellos de 70 cm, igual al radio de los mismos. Ello nos asegura un campo magnético totalmente homogéneo en todo el volumen a incubar. Dicha homogeneidad del campo magnético fue constantemente comprobada con su continua medición.

Para nuestra experiencia hemos utilizado un total de 488 huevos fertilizados, divididos en tres

grupos, los cuales fueron expuestos a campos magnéticos de intensidad y frecuencia que a continuación expondremos. A cada uno de los mencionados grupos experimentales, se les asignó un número de huevos controles incubados a la par, en incubadora independiente.

Grupos de experimentación

El grupo experimental de huevos embrionados ha sido sometido durante todo el proceso de experimentación a la acción de las siguientes intensidades de campo magnético y frecuencias:

Grupo I: constituido por 78 huevos embrionados. Fueron sometidos a 1 microtesla de intensidad y 30 Hz de frecuencia.

Grupo II: constituido por 80 huevos embrionados. Fueron sometidos a 1 microtesla de intensidad y 50 Hz de frecuencia.

Grupo III: constituido por 85 huevos embrionados. Fueron sometidos a 1 microtesla de intensidad y 100 Hz de frecuencia.

El total, por lo tanto, de huevos sometidos a la acción de los campos magnéticos ha sido de 243 huevos.

Cada uno de estos grupos ha sido comparado con su grupo control correspondiente en la cantidad que a continuación expresamos. Para el grupo I metemos 100 huevos en la incubadora, para el grupo II metemos 70 huevos y para el grupo III metemos 75 huevos. El número total de huevos embrionados controles para la experiencia ha sido pues de 245 huevos.

Tanto del grupo control como de los tratados se realizaron dos extracciones: a los 15 y a los 21 días (recién nacidos) de incubación, escogiendo al azar en cada extracción un número aproximado de 20 huevos.

Elegimos para su extracción los 15 y 21 días de incubación debido a que en el primer caso, el embrión acusa con mayor intensidad en su embriogénesis, cualquier elemento teratógeno que se administre; y el período de recién nacido (21 días) por ser el resultado final de cualquier alteración embriológica.

Tras realizar las extracciones se procede inmediatamente al examen del embrión (15 días) o del pollo recién nacido (21 días), llevándose a cabo el análisis de los siguientes parámetros mediante el ecógrafo HONDEX A/B SCAN IS-500:

— Parámetros antero-posteriores de cornea.

— Cámara anterior (considerando que en oftalmología se considera cámara anterior al espa-

cio comprendido entre la parte posterior de la cornea y la anterior del cristalino).

- Parámetros antero-posteriores del cristalino.
- Parámetros antero-posteriores del globo ocular total.

Análisis estadístico

Para poner de manifiesto la significatividad de las diferencias encontradas al establecer comparaciones de los distintos parámetros estudiados entre el grupo control y los diversos grupos tratados, se han realizado las correspondientes pruebas T para muestras independientes. Estos estudios estadísticos se han realizado por medio del sistema SSPS Base 10.0 para Windows.

RESULTADOS OBTENIDOS

Diámetro antero-posterior de la córnea (Tabla I, Figuras 1 y 2)

El diámetro antero-posterior de la córnea, es decir el grosor de la misma, se encuentra en los embriones tratados extraídos a los 15 días de incubación significativamente mayor ($p < 0,05$) en los sometidos a $1 \mu\text{T}$ de intensidad y frecuencia de 30 y 50 Hz respecto a los embriones controles. En estos mismos días de incubación, los embriones sometidos a $1 \mu\text{T}$ 100 Hz presentan un menor grosor de córnea, con diferencias no significativas.

Por lo que respecta a los 21 días de incubación, solamente los embriones sometidos a $1 \mu\text{T}$

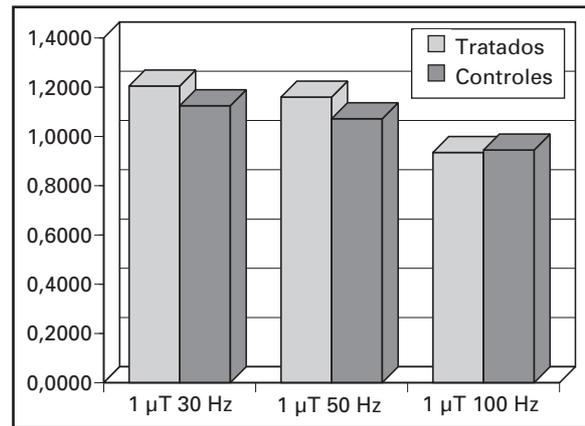


Figura 1. Diámetro antero-posterior de la córnea (15 días).

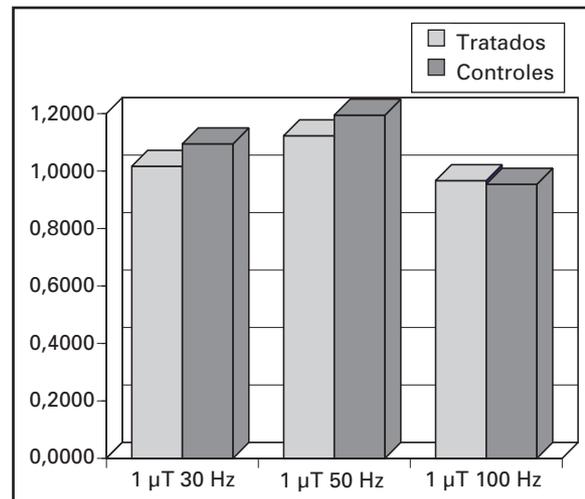


Figura 2. Diámetro antero-posterior de la córnea (21 días).

TABLA I. Diámetro antero-posterior de la córnea (mm)

Campo magnético intensidad-frecuencia	15 días de incubación	21 días de incubación
1 μT – 30 Hz	Controles ($n = 20$): $1,1250 \pm 0,1209$ *	Controles ($n = 19$): $1,0947 \pm 0,1177$ *
	Tratados ($n = 20$): $1,2050 \pm 9,987 \text{ E-}02$	Tratados ($n = 18$): $1,0167 \pm 7,071 \text{ E-}02$
1 μT – 50 Hz	Controles ($n = 18$): $1,0722 \pm 0,1074$ *	Controles ($n = 19$): $1,1947 \pm 5,243 \text{ E-}02$ NS
	Tratados ($n = 20$): $1,1600 \pm 0,1142$	Tratados ($n = 19$): $1,1226 \pm 0,2678$
1 μT – 100 Hz	Controles ($n = 20$): $0,9450 \pm 0,1468$ NS	Controles ($n = 37$): $0,9541 \pm 7,672 \text{ E-}02$ NS
	Tratados ($n = 20$): $0,9350 \pm 4,894 \text{ E-}02$	Tratados ($n = 21$): $0,9667 \pm 7,303 \text{ E-}02$

Todos los valores son medias \pm SD. n indica el número de individuos de cada grupo experimental. N.S.= no significativo.
* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; expresan la significatividad de las diferencias al comparar los tratados con los controles.

30 Hz, presentan el grosor de la córnea mayor en los animales tratados con respecto a los controles con una p significativa menor que 0,05. En el resto de frecuencias, las modificaciones que presenta el diámetro antero-posterior de la córnea es diverso, pero en todas ellas estadísticamente no presentan significatividad alguna.

Distancia entre cara posterior de la córnea y cara anterior del cristalino
(Tabla II, Figuras 3 y 4)

La distancia que media entre la cara posterior de la córnea y la cara anterior del cristalino (en la clínica diaria se denomina cámara anterior) a los 15 días de incubación se presenta en los embriones sometidos a campos magnéticos, mayor que en los embriones control de la misma edad. Tenemos que hacer la salvedad que solamente los embriones sometidos a 1 μ T 100 Hz, el aumento de este parámetro es significativo respecto a los controles ($p < 0,05$), no presentando significatividad estadística en el resto de los casos.

A los 21 días de incubación, la distancia entre córnea y cristalino es, en la mayoría de los casos, menor en los embriones sometidos a campos magnéticos respecto a los controles. Sin embargo, esta disminución sólo es significativa respecto a los controles en los embriones sometidos a 1 μ T 50 Hz, con una significatividad de $p < 0,01$.

Diámetro antero-posterior del cristalino
(Tabla III, Figuras 5 y 6)

El diámetro antero-posterior máximo del cristalino a los 15 días de incubación es mayor en los

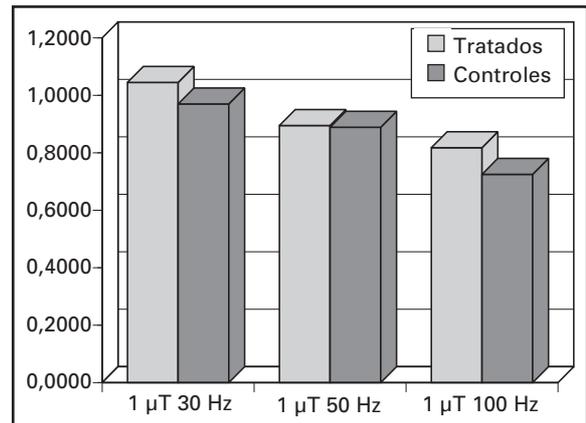


Figura 3. Cara posterior de la córnea y cara anterior del cristalino (15 días).

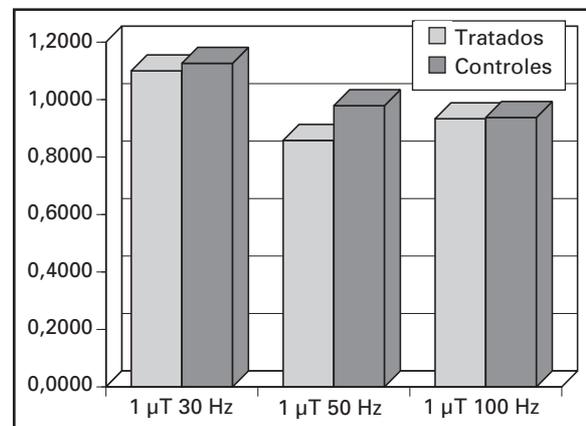


Figura 4. Cara posterior de la córnea y cara anterior del cristalino (21 días).

embriones tratados que en los controles. Sin embargo, este aumento en el parámetro del cristalino sólo presenta diferencias significativas en los

TABLA II. Cara posterior córnea-anterior cristalino (mm)

Campo magnético intensidad-frecuencia	15 días de incubación		21 días de incubación	
	Controles	Tratados	Controles	Tratados
1 μ T – 30 Hz	(n = 20): 0,9700 \pm 0,2319 NS	(n = 20): 1,0450 \pm 0,1669	(n = 19): 1,1263 \pm 0,1408 NS	(n = 18): 1,1000 \pm 0,1188
1 μ T – 50 Hz	(n = 18): 0,8889 \pm 0,1530 NS	(n = 20): 0,8950 \pm 0,1669	(n = 19): 0,9789 \pm 9,177 E-02 **	(n = 19): 0,8579 \pm 0,1305
1 μ T – 100 Hz	(n = 20): 0,7250 \pm 0,1118 *	(n = 20): 0,8100 \pm 0,1165	(n = 37): 0,9378 \pm 4,917 E-02 NS	(n = 21): 0,9333 \pm 7,303 E-02

Todos los valores son medias \pm SD. n indica el número de individuos de cada grupo experimental. N.S.= no significativo. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; expresan la significatividad de las diferencias al comparar los tratados con los controles.

TABLA III. Diámetro antero-posterior del cristalino (mm)

Campo magnético intensidad-frecuencia	15 días de incubación	21 días de incubación
1 μ T – 30 Hz	Controles (n = 20): 1,2900 \pm 0,4712 NS	Controles (n = 19): 1,2895 \pm 3,153 E-02 *
	Tratados (n = 20): 1,4700 \pm 0,2430	Tratados (n = 18): 1,2389 \pm 9,785 E-02
1 μ T – 50 Hz	Controles (n = 18): 0,7500 \pm 9,852 E-02 *	Controles (n = 19): 0,9747 \pm 0,2383 NS
	Tratados (n = 20): 0,8250 \pm 0,1070	Tratados (n = 19): 1,0263 \pm 0,1522
1 μ T – 100 Hz	Controles (n = 20): 0,7600 \pm 9,403 E-02 ***	Controles (n = 37): 0,9351 \pm 4,840 E-02 NS
	Tratados (n = 20): 0,9050 \pm 0,1395	Tratados (n = 21): 0,9429 \pm 0,1076

Todos los valores son medias \pm SD. n indica el número de individuos de cada grupo experimental. N.S.= no significativo. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; expresan la significatividad de las diferencias al comparar los tratados con los controles.

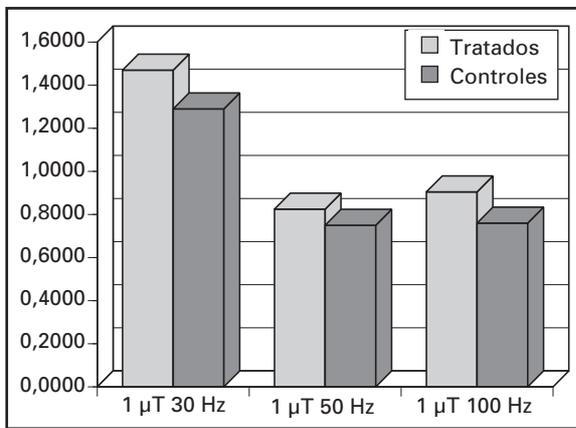


Figura 5. Diámetro antero-posterior del cristalino (15 días).

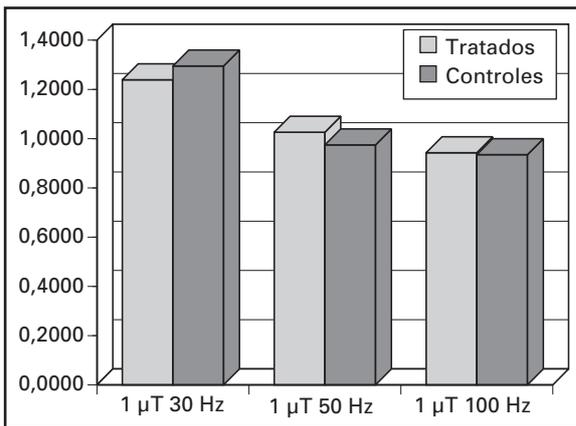


Figura 6. Diámetro antero-posterior del cristalino (21 días).

tratados respecto a los controles en 1 μ T de intensidad con 50 y 100 Hz de frecuencia ($p < 0,05$ y $p < 0,001$ respectivamente).

El análisis de este parámetro a los 21 días de incubación ofrece un panorama diferente. Así, los embriones sometidos durante su desarrollo a campos magnéticos de 1 μ T 30 Hz presentan un diámetro antero-posterior del cristalino significativamente menor con respecto a los embriones control, con una significatividad respectiva de $p < 0,05$. Los embriones sometidos a 1 μ T 50 y 100 Hz presentan este parámetro igual que a los 15 días de incubación, mayor en los tratados respecto a los controles con diferencias que no son significativas.

Diámetro antero-posterior del globo ocular
(Tabla IV, Figuras 7 y 8)

El diámetro antero-posterior del globo ocular medido a los 15 días de incubación en los embriones, que han sido sometidos en su desarrollo a 1 μ T 30 y 100 Hz, presentan este parámetro mayor que en los controles. Por el contrario, los embriones que han sido sometidos a 1 μ T 50 Hz presentan este parámetro menor que en los controles con una diferencia significativa respecto a los controles de $p < 0,01$.

Cuando observamos este parámetro a los 21 días de incubación, vemos que es mayor en los embriones tratados con campos magnéticos respecto a los controles, excepto en los sometidos a 1 μ T 50 Hz, que presenta este parámetro menor que los controles, exactamente igual que lo encontrado con la misma intensidad y frecuencia en los 15 días de incubación. El aumento en el diámetro antero-posterior del globo ocular en los embriones tratados sólo es estadísticamente significativo en los embriones sometidos a 1 μ T 30 Hz ($p < 0,05$).

TABLA IV. Diámetro antero-posterior del globo ocular (mm)

Campo magnético intensidad-frecuencia	15 días de incubación	21 días de incubación
1 μ T – 30 Hz	Controles ($n = 20$): $8,3700 \pm 0,8980$ NS	Controles ($n = 19$): $8,6368 \pm 0,3353$ *
	Tratados ($n = 20$): $8,7250 \pm 0,6043$	Tratados ($n = 18$): $8,8722 \pm 0,2740$
1 μ T – 50 Hz	Controles ($n = 18$): $9,3222 \pm 0,3735$ **	Controles ($n = 19$): $8,9000 \pm 0,4643$ NS
	Tratados ($n = 20$): $8,9500 \pm 0,4443$	Tratados ($n = 19$): $8,8684 \pm 0,4110$
1 μ T – 100 Hz	Controles ($n = 20$): $8,4100 \pm 0,4327$ NS	Controles ($n = 37$): $8,6135 \pm 0,4360$ NS
	Tratados ($n = 20$): $8,4350 \pm 0,4271$	Tratados ($n = 21$): $8,6429 \pm 0,4802$

Todos los valores son medias \pm SD. n indica el número de individuos de cada grupo experimental. N.S.= no significativo. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; expresan la significatividad de las diferencias al comparar los tratados con los controles.

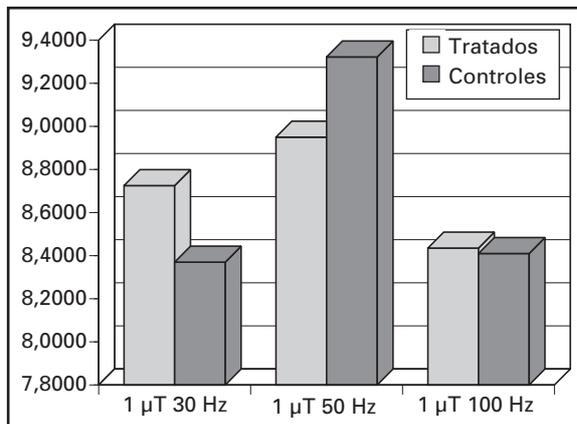


Figura 7. Diámetro antero-posterior del globo ocular (15 días).

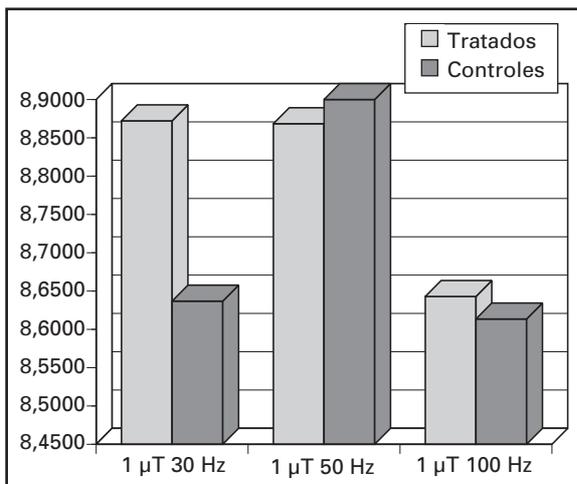


Figura 8. Diámetro antero-posterior del globo ocular (21 días).

DISCUSIÓN

La electricidad desempeña un papel fundamental en la organización neuromoduladora de los seres vivos. La mayoría de las células animales presentan una diferencia de potencial entre el interior y el exterior de la célula. Esto existe de manera más pronunciado en las células del tejido nervioso y muscular donde, en estado de reposo, el potencial interior es de unos -85 mV con respecto al potencial exterior. Un impulso nervioso es un cambio en este potencial que se propaga a lo largo de una fibra nerviosa o axón. Un impulso nervioso, al alcanzar una fibra muscular, produce cambios de potencial semejantes que se propagan a lo largo de la fibra, iniciando la contracción de la misma. La anguila eléctrica produce un gran potencial que utiliza para su defensa, pero muchos peces producen un pequeño potencial que emplean para detectar objetos en las aguas circundantes (26). Podemos hablar pues de bioelectricidad.

El potencial de reposo de una célula está producido por diferencias en la concentración de iones dentro y fuera de la célula, y por diferencias en la permeabilidad de la pared celular a los diferentes iones. Este es el llamado **potencial de equilibrio de Nernst**, el cual es negativo cuando la membrana es permeable a los iones positivos, y positivo cuando la membrana es permeable a los iones negativos.

Los efectos que los campos magnéticos ejercen en las entidades biológicas dependen de varios factores: la intensidad del campo y la frecuencia, y de la sensibilidad tisular. La acción de un campo magnético sobre el organismo modifi-

ca el efecto del campo magnético terrestre, reorientando las moléculas y los átomos dipolares. También producen cambios de sentido de las cargas eléctricas sometidas al campo magnético, el llamado «efecto Hall», ocasionando con ello una concentración diferente de los iones positivos y negativos, que establece una diferencia de potencial. Las moléculas complejas, como el citosol celular, sufren, por la acción de los campos magnéticos, una distorsión, atrayendo los grupos positivos a un lado y los negativos al opuesto; lo cual provoca una distorsión de los enlaces interatómicos y una ruptura de las macromoléculas.

Los campos electromagnéticos pulsados estáticos de 50-60 Hz de frecuencia, basándose en el efecto Hall, pueden modificar el flujo de cationes a través de las membranas biológicas (27), provocando alteraciones en el metabolismo de las células.

En el ambiente habitual en que vivimos, los campos magnéticos que habitualmente se encuentran, pueden motivar interacciones biológicamente significativas entre los cationes transportados y las propiedades básicas de las proteínas del canal del catión. Estas interacciones pueden generar fuerzas prácticamente iguales a las creadas por los cambios de membranas normales conocidos por la puerta de entrada de los canales de cationes. Por ello, los campos magnéticos pueden regular el flujo a través de los canales de cationes regulando por ello los procesos metabólicos.

Sobre los seres vivos, las acciones que pueden ejercer los campos electromagnéticos son muy variadas. En primer lugar se conoce con claridad que producen modificaciones en la permeabilidad de las membranas celulares, provocando una diferente distribución de los iones a uno y a otro lado de la misma. La bomba de sodio-potasio aumenta su actividad, así como la utilización de ATP. Como consecuencia, se retiene más sodio y se libera menos potasio. Se producen modificaciones en el flujo intracelular del calcio, provocando con ello que la osteogénesis aumente su actividad.

Los campos magnéticos producen una reordenación de las proteínas que forman el colágeno, y elevan la actividad de los osteoblastos y osteoclastos. Aumentan, asimismo, la absorción de las proteínas, las alteraciones del equilibrio enzimático, aumentan la velocidad de la coagulación y de la circulación sanguínea.

Debido a la acción que producen los campos magnéticos sobre las membranas neuronales pueden provocarse anomalías en el comportamiento y dan lugar también a cuadros de cefaleas, bradicardia, hipotensión, aumento de la sudoración etc.

En el tejido sanguíneo, los campos magnéticos pueden ocasionar discreta leucocitosis, aumento de neutrófilos y de reticulocitos, hechos que se han observado en sujetos expuestos habitualmente a campos magnéticos producidos por corrientes de 500 Kv.

Actualmente, el tema de si los campos magnéticos suponen un riesgo para la salud no tienen un respaldo unánime de la comunidad científica dedicada a su estudio. Incluso los que ven en ello un problema no definen el tipo exacto de agresión que ocasionan. Esta falta de conclusiones ha dado como resultado final una mezcla confusa de advertencias sobre la acción inmediata a tomar sobre el papel medioambiental que ejercen los campos magnéticos de baja y extremadamente baja frecuencia sobre la salud de los seres vivos, y especialmente para facilitar y definir el tipo de respuesta institucional que deben dar al problema la comunidad científica, el sistema legal y la burocracia pública (28).

El mecanismo básico biológico por el cual los campos magnéticos actúan sobre el hombre no se conoce en la actualidad, entre otras cosas, el hombre no posee órganos específicos para la percepción de dichos campos.

Por lo que se refiere a los campos magnéticos de extremadamente baja frecuencia (ELF), es decir, con una frecuencia entre 3 y 30 Hz como es el caso de nuestra experiencia, al tener escasa energía no producen calentamiento y no se conocen los mecanismos de interacción que expliquen, los efectos biológicos que se detectan ante una exposición.

Aunque no se conocen con claridad los mecanismos por los cuales los campos electromagnéticos actúan sobre los sistemas biomoleculares y los tejidos, vamos a señalar algunas interacciones que pueden suceder cuando se somete al organismo a la acción de campos electromagnéticos estáticos según Czerski (29). Estos efectos son los siguientes:

— Efectos electrodinámicos y magnetodinámicos.

— Efectos magnetomecánicos, que se refieren a la posición y orientación de las biomoléculas ante la presencia de campos magnéticos. Aunque como el cuerpo tiene un material magnético limitado, estos efectos son despreciables en la actividad biológica.

— Intervenciones a nivel atómico y nuclear. Parece que el efecto primario de los campos magnéticos en la modificación ejercida en la cinética del calcio, analizada fundamentalmente a nivel de la membrana neuronal.

— Otras acciones son la motilidad de fluidos del cuerpo: la situación de los individuos respecto a los campos electromagnéticos, edad, sexo, estado de salud, factores ambientales, etc.

El mecanismo básico biológico que ejercen los campos electromagnéticos sobre el hombre realmente no se conoce en el momento presente, y será difícil de aclarar en el futuro, entre otras cosas, porque el hombre no posee órganos específicos para la percepción de los campos electromagnéticos.

Por lo que se refiere al discutido tema de si los campos electromagnéticos suponen un riesgo o no para la salud, no tiene en la actualidad ningún consenso entre los científicos que se dedican a su estudio. Pero, incluso, para los que dicen que los campos electromagnéticos suponen un factor grave de riesgo para la salud, no dicen el tipo de lesión clara que produce la exposición prolongada a los mismos, ni especifican la intensidad y la frecuencia plenamente definida de los campos electromagnéticos.

Esta falta de conclusiones a la que, hasta el presente, han llegado los científicos ha ocasionado que las instituciones sociales y políticas tengan también perspectivas diferentes para el problema. Sólo pueden observar una mezcla confusa de advertencias con relación a la acción inmediata que hay que adoptar sobre el papel medioambiental que ejercen los campos electromagnéticos de baja y extremadamente baja frecuencia en la salud de la población y, sobre todo, para facilitar las respuestas institucionales que deben de dar al problema, conjuntamente, la comunidad científica, el sistema legal y la burocracia pública.

La investigación experimental ha venido demostrando que los entes biológicos presentan una alta sensibilidad a los campos eléctricos y magnéticos. La intensidad de la acción depende de los parámetros del campo electromagnético y del estado funcional en que se encuentran los seres vivos. Hay que tener presente, que lo que suele ocurrir en los modelos experimentales, en un principio, un fenómeno adaptativo, y que si estos fracasan para asumir la agresión es cuando se producen los cambios patológicos pertinentes.

Toroptsev IU y Taranov SV (30) apuntan los siguientes componentes en el mecanismo de la acción biológica de los campos electromagnéticos:

- La interacción quantum-bioquímica del campo magnético con el sustrato biológico.
- La recepción, por el ser vivo, de los resultados del efecto del campo magnético.
- La respuesta del sistema.

Teniendo en cuenta que el período embrionario constituye uno de los momentos biológicos, que posee mayor dinamismo, y un complejo número de factores inductivos, tanto de tipo bioquímico como mutagénicos, fundamentalmente en los que se refiere a los estadios iniciales de desarrollo y crecimiento, hemos elegido este período como estado ideal para estudiar de que forma puede interferir en ello los campos electromagnéticos.

En estas fases del desarrollo, la actividad funcional de los órganos y de los sistemas y la capacidad de adaptación y defensa del nuevo ser no está organizada, y por ello se encuentra en la fase de mayor sensibilidad ante los agentes externos a su propia normalidad ambiental, y, por ello pueden producir agresiones y dismorfogénesis con una mayor facilidad.

Todo ello nos lleva a comprender con facilidad que cualquier agente extraño, tanto físico como químico y medicamentoso, que actúe sobre el organismo en estas fases del desarrollo biológico, puede provocar alteraciones pasajeras o irreversibles en una organización, las cuales pueden evidenciarse en ciertos momentos del ciclo embrionario o manifestarse en el momento del nacimiento.

En nuestro trabajo de investigación hemos utilizado el embrión de pollo, como ente biológico, para someterlo a la acción de campos electromagnéticos durante todo el proceso embrionario, de baja y extremadamente baja frecuencia 30, 50 y 100 Hz con 1 microtesla (μT) de intensidad. A los 15 y 21 días de incubación se ha analizado una serie de parámetros oculares que pueden dar luz, a nivel morfológico, de las posibles interferencias que pueden ejercer los campos electromagnéticos sobre el desarrollo embrionario y fetal.

Nuestro objetivo ha sido someter a los embriones de pollo, durante todo el período de incubación, a la acción directa de campos magnéticos de 1 μT de intensidad, de bajas frecuencias (50 y 100 Hz) y de extremadamente baja frecuencia (30 Hz). De este modo intentábamos conocer la acción que podría ejercer en el globo ocular del embrión estas dos intensidades con alguna de las frecuencias analizadas.

Al analizar los posibles efectos producidos en el globo ocular de los embriones sometidos a campos magnéticos, hemos encontrado en nuestra experiencia que, a los 15 días de incubación, la córnea presenta un mayor grosor en los embriones sometidos a 1 μT de intensidad con frecuencias de 30 y 50 Hz, siendo estas diferencias significativas respecto a los controles.

La distancia entre la cara posterior de la córnea y la cara anterior del cristalino, es decir, la cámara anterior y posterior del globo ocular anatómicamente hablando, sólo se ve afectada significativamente en los embriones sometidos a 1 μ T y 100 Hz, dando una distancia significativamente mayor que en los controles a los 15 días de incubación. Sin embargo, en los analizados a los 21 días de incubación, esta distancia es significativamente menor respecto a los controles en los embriones sometidos a 1 μ T con 50 Hz.

El diámetro antero posterior del cristalino es significativamente mayor que en los controles a los 15 días de incubación, en aquellos embriones sometidos a 1 μ T, 50 y 100 Hz. Mientras que a los 21 días de incubación se hace significativamente menor en 1 μ T, 50 Hz.

El globo ocular en su conjunto, es decir, en su diámetro antero posterior, también se ve afectado en los embriones sometidos a campos magnéticos observando en estos parámetros los siguientes datos. A los 15 días de incubación es significativamente menor en el tratado con 1 μ T, 50 Hz, respecto a los controles de la misma edad. Cuando este parámetro se analiza a los 21 días de incubación, se presenta significativamente mayor en 1 μ T, 30 Hz, que en los controles.

Aunque la acción de los campos magnéticos sobre el desarrollo ocular podemos decir que es un factor agresivo, sin embargo, no podemos contrastar nuestros estudios con los de otros autores ya que en la bibliografía consultada no hemos encontrado ninguna experiencia sobre el particular.

CONCLUSIONES

Al someter a los embriones de pollo a campos magnéticos de baja (50-100 Hz) y extremadamente baja frecuencia (30 Hz), durante todo el período de incubación, podemos decir que los campos magnéticos influyen sobre el desarrollo del globo ocular ocasionando las siguientes modificaciones:

— En el día 15 de incubación encontramos aumentados, de manera significativa en los embriones tratados con respecto a los controles, los siguientes parámetros: el grosor de la córnea en los tratados con 1 microtesla 30-50 Hz; la distancia entre cara posterior de la córnea y la cara anterior cristalino en los tratados con 1 microtesla 100 Hz; el grosor del cristalino en los tratados con 1 microtesla 50-100 Hz. Los parámetros que se encuentran disminuidos en los tratados de manera

significativa con respecto a los controles son: eje antero posterior del globo ocular en los tratados con 1 microtesla 100 Hz.

— Por lo que respecta a los extraídos a los 21 días son significativamente menores en los controles que en los tratados los siguientes parámetros: el grosor de córnea en los tratados con 1 microtesla 30 Hz; distancia entre córnea y cristalino en los tratados con 1 microtesla 50 Hz, y grosor del cristalino en los tratados con 1 microtesla 30 Hz. Mientras que el eje antero posterior del globo ocular se presenta significativamente mayor en los tratados que en los controles con 1 microtesla 30 Hz.

Con la presente investigación hemos intentado conocer si los campos magnéticos de baja frecuencia podrían afectar al globo ocular durante el proceso del desarrollo embrionario. Los resultados obtenidos nos indican que los campos magnéticos pueden afectar la morfología del globo ocular, aunque pensamos que queda un gran camino por recorrer para llegar a conclusiones determinantes.

Nuestros resultados no los hemos podido contrastar con otros similares realizados, porque no hemos encontrado ningún dato bibliográfico que nos sirva de referente.

BIBLIOGRAFÍA

1. OLSEN J H, JENSEN J K, NIELSEN A, SCHULGEN G. Electromagnetic fields from high-voltage installations and cancer in childhood. *Ugeskr Laeger*. 1994;156 (17): 2579-2584.
2. KNAVE B. Electric and magnetic fields and health outcomes—an overview. *Scand J Work Environ Health*. 1994; 20 Spec: 78-89.
3. FEYCHTING M, SCHULGEN G, OLSEN J H, AHLBOM A. Magnetic fields and childhood cancer—a pooled analysis of two Scandinavian studies. *Eur J Cancer*. 1995; 31A (12): 2035-2039.
4. KRAUT A, TATE R, TRAN N. Residential electric consumption and childhood cancer in Canada (1971-1986). *Arch Environ Health*. 1996; 49 (3): 156-159.
5. TYNES T, HALDORSEN T. Electromagnetic fields and cancer in children residing near Norwegian high-voltage power lines. *Am J Epidemiol*. 1997; 145 (3): 219-226.
6. MICHAELIS J, SCHUZ J, MEINERT R, ZEMANN E, GRIGAT J P, KAATSCH P, KALETSCH U, MIESNER A, BRINKMANN K, KALKNER W, KARNER H. Combined risk estimates for two german population-based case-control studies on residential magnetic fields and childhood acute leukemia. *Epidemiology*. 1998; 9 (1): 92-94.

7. LI CY, LEE W C, LIN R S. Risk of leukemia in children living near high-voltage transmission lines. *J Occup Environ Med.* 1998; 40 (2): 144-147.
8. JUUTILAINEN J, MATILAINEN P, SAARIKOSKI S, LARA E, SUONIO S. Early pregnancy loss and exposure to 50-Hz magnetic fields. *Bioelectromagnetics.* 1993; 14 (3): 229-236.
9. FLODERUS B, TORNOQVIST S, STENLUND C. Incidence of selected cancers in Swedish railway workers, 1961-79. *Cancer Causes Control.* 1994; 5 (2): 189-194.
10. ALFREDSSON L, HAMMAR N, KARLEHAGEN S. Cancer incidence among male railway engine-drivers and conductors in Sweden, 1976-90. *Cancer Causes Control.* 1996; 7 (3): 377-381.
11. THERIAULT G, GOLDBERG M, MILLER A B, ARMSTRONG B, GUENEL P, DEADMAN J, IMBERNON E, TO T, CHEVALIER A, CYR D. Cancer risks associated with occupational exposure to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and France: 1970-1989. *Am J Epidemiol.* 1994; 139 (6): 550-572.
12. ARMSTRONG B, THERIAULT G, GUENEL P, DEADMAN J, GOLDBERG M, HEROUX P. Association between exposure to pulsed electromagnetic fields and cancer in electric utility workers in Quebec, Canada, and France. *Am J Epidemiol.* 1994; 140 (9): 805-820.
13. MILLER A B, TO T, AGNEW D A, WALL C, GREEN L M. Leukemia following occupational exposure to 60-Hz electric and magnetic fields among Ontario electric utility workers. *Am J Epidemiol.* 1996; 144 (2): 150-160.
14. GUENEL P, NICOLAU J, IMBERNON E, CHEVALIER A, GOLDBERG M. Exposure to 50-Hz electric field and incidence of leukemia, brain tumors, and other cancers among French electric utility workers. *Am J Epidemiol.* 1996; 144 (12): 1107-1121.
15. MYERS A, CLAYDEN A D, CARTWRIGHT R A, CARTWRIGHT S C. Childhood cancer and overhead powerlines: a case-control study. *Br J Cancer.* 1990; 62 (6): 1008-1014.
16. VERKASALO P K, PUKKALA E, HONGISTO M Y, VALJUS J E, JARVINEN P J, HEIKKILA K V, KOSKENVUO M. Risk of cancer in Finnish children living close to power lines. *BMJ.* 1993; 307 (6909): 895-899.
17. PRESTON-MARTIN S, NAVIDI W, THOMAS D, LEE P J, BOWMAN J, POGODA J. Los Angeles study of residential magnetic fields and childhood brain tumors. *Am J Epidemiol.* 1996; 143 (2): 105-119.
18. PETRIDOU E, TRICHOPOULOS D, KRAVARITIS A, POURTSIDIS A, DESSYPRIS N, SKALKIDIS Y, KOGEVINAS M, KALMANTI M, KOLIOUSKAS D, KOSMIDIS H, PANAGIOTOU J P, PIPEROPOULOU F, TZORTZATOU F, KALAPOTHAKI V. Electrical power lines and childhood leukemia: a study from Greece. *Int J Cancer.* 1997; 73 (3): 345-348.
19. KHEIFETS L I, SUSSMAN S S, PRESTON-MARTIN S. Childhood brain tumors and residential electromagnetic fields (EMF). *Rev Environ Contam Toxicol.* 1999; 159: 111-129.
20. FEYCHTING M, FLODERUS B, AHLBOM A. Parenteral occupational exposure to magnetic fields and childhood cancer (Sweden). *Cancer Causes Control.* 2000; 11 (2): 151-156.
21. STRZHIZHOVSKII A D, GALAKTIONOVA G V, CHERMNYKH P A. Tissue specificity of changes in mitotic activity induced by strong magnetic fields. *Tsitologiya.* 1980; 22 (2): 205-209.
22. LANKOSZ J, TOKARZ J, WESELUCHA P, OCHMANSKI W, GZYL E, BARBARO B, GATARSKI J, DROZDZEWICZ L, KIELAR I. Health Status Of The Workers Exposed to strong, constant magnetic fields. *Med Pr.* 1983; 34 (1): 65-73.
23. SKRINNIK A V. Effect of a pulsed magnetic field on corneal permeability and the sorption properties of tissue structures and refractive media of the eye. *Biull Eksp Biol Med.* 1985; 100 (10): 429-431.
24. KUES H A, D'ANNA S A, OSIANDER R, GREEN W R, MONAHAN J C. Absence of ocular effects after either single or repeated exposure to 10mW/cm(2) from a 60GHz CW source. *Bioelectromagnetics.* 1999; 20 (8): 463-473.
25. BOROOJERDI B, PRAGER A, MUELLBACHER W, COHEN L. Reduction of human visual cortex excitability using 1-Hz transcranial magnetic stimulation. *Neurology.* 2000; 54 (7): 1529-1531.
26. VANDER A J. Direct effects of potassium on renin secretion and renal function. *Am J Physiol.* 1970; 219 (2): 455-459.
27. BALCAVAGE W X, ALVAGER T, SWEZ J, GOFF C W, FOX M T, ABDULLYAVA S, KING M W. A mechanism for action of extremely low frequency electromagnetic fields on biological systems. *Biochem Biophys Res Commun.* 1996; 222 (2): 374-378.
28. LINDER S H. Ambiguous evidence and institutional interpretation: an alternative view of electric and magnetic fields. *J Health Polit Policy Law.* 1994; 19 (1): 165-190.
29. CORTES R. Terrorismo energético (La amenaza de los campos electromagnéticos). *An R Acad Nac Med (Madrid).* 1992; 109 (2): 429-464.
30. TOROPTSEV I V, TARANOV S V. Morphological characteristics and various theories on the mechanism of biological effect of magnetic fields. *Arkh Patol.* 1982; 44 (12): 3-11.