

# USOS MÉDICOS DE RADIACIONES NO IONIZANTES

El artículo describe diversas aplicaciones clínicas de las radiaciones no ionizantes, centrándose en el rango de frecuencias Hz-GHz. Dependiendo de las características de la señal, las aplicaciones abarcan áreas terapéuticas diversas, incluyendo la osteología y traumatología, regeneración tisular, fisioterapia, tratamiento del dolor crónico, la neurología, cardiología, urología y la oncología. Las terapias electromagnéticas se han revelado simples, seguras, carentes de efectos secundarios, de bajo coste y capaces de tratar las patologías subyacentes sin limitarse a aliviar los síntomas. Cabe, pues, prever que estas terapias tendrán un impacto profundo en salud pública y en los costes asociados.

## INTRODUCCIÓN

Dicho en términos simples, en contraste con la radiación ionizante (RI), la radiación no ionizante (RNI) carece de energía suficiente para arrancar un electrón de un átomo o molécula. En otras palabras, las RNI no son capaces de inducir ionización, aunque sí pueden inducir excitación, transfiriendo los electrones a niveles de energía superiores. Aparte de eso, conviene recordar que, a igualdad de otros parámetros físicos, la energía transmitida a un cuerpo expuesto a una RNI incrementa con la frecuencia de la señal, y que a mayor frecuencia, menor es la penetrabilidad la radiación en un cuerpo expuesto dado. De forma que una señal electromagnética de 50 Hz, por ejemplo, puede atravesar com-

pletamente un cuerpo humano sin apenas sufrir perturbación alguna. Por el contrario, señales de frecuencias superiores, del orden de los GHz o THz, resultarán absorbidas mayoritariamente por la piel y los tejidos conjuntivos o adiposos subcutáneos. Por último, dependiendo de su frecuencia específica, la intensidad o potencia de la señal NI decae con el cuadrado o el cubo de la distancia a la fuente emisora.

La Figura 1 muestra el espectro electromagnético en los rangos de las RNI y RI. Sobre la escala logarítmica de frecuencias no ionizantes se representan aquellas a las que operan los principales sistemas de uso terapéutico o diagnóstico. En el presente artículo nos centraremos



## ALEJANDRO ÚBEDA MAESO

Investigador Jefe del Servicio BEM.  
H.U. RAMÓN Y CAJAL  
INSTITUTO RAMÓN Y CAJAL  
DE INVESTIGACIÓN SANITARIA

Especializado en el estudio de los bioefectos de los campos electromagnéticos.



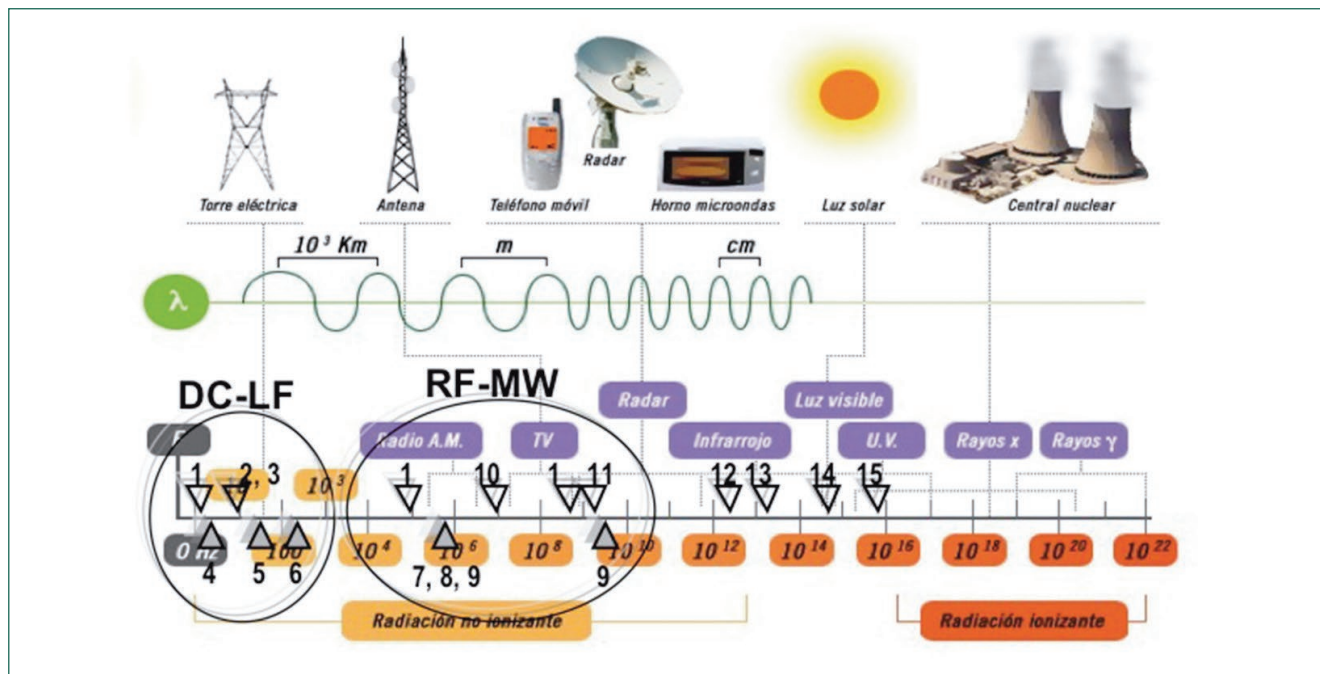
## MARÍA ÁNGELES TRILLO RUIZ

Investigadora del Servicio BEM.  
H.U. RAMÓN Y CAJAL  
INSTITUTO RAMÓN Y CAJAL  
DE INVESTIGACIÓN SANITARIA

Bióloga con formación postdoctoral en biofísica de campos electromagnéticos en la US EPA.

## MEDICAL USES NON-IONIZING RADIATION

This article reviews various clinical applications of non-ionizing radiation, focusing on the Hz-GHz frequency range. Depending on the signal characteristics, the applications cover several therapeutic areas, including osteology and traumatology, tissue regeneration, physiotherapy, chronic pain treatment, neurology, cardiology, urology and oncology. Electromagnetic therapies have proved simple, safe, low cost, devoid of side effects and able to treat the underlying pathology rather than simply alleviate the symptoms. Therefore, it is predictable that these therapies will have a serious impact on public health and associated costs.



**Figura 1.** Frecuencias a las que operan los principales equipos médicos basados en la exposición a campos magnéticos/electromagnéticos (▼) o a campos eléctricos/corrientes (▲). 1: Imagen por Resonancia Magnética; 2: Estimulación Magnética Transcranial; 3: Magnetoterapia; 4: Electroporación; 5: Estimulación Nerviosa Eléctrica Transcutánea; 6: Corrientes Interferenciales; 7: Transferencia Eléctrica Capacitiva-Resistiva; 8: Hipertermia por Fluido Magnético; 9: Ablación Tumoral; 10: Diatermia de Onda Corta; 11: Diatermia de Microondas; 12: Infrarrojo; 13: LASER; 14: Visible; 15: Ultravioleta.

en las principales aplicaciones de las frecuencias de la parte baja del espectro no ionizante, que corresponde a los conocidos comúnmente como campos electromagnéticos (CEM): desde los campos de frecuencias ultrabajas y bajas (ELF-LF) a las radiofrecuencias y microondas (RF-MW). Dejaremos para una futura oportunidad la descripción de las aplicaciones de frecuencias superiores, incluyendo la radiación infrarroja, Láser, visible y ultravioleta, así como la de aplicaciones diagnósticas basadas en la obtención de imágenes por resonancia magnética o por radiación infrarroja.

Desde un punto de vista biomédico, los efectos atribuidos a los CEM son, según su frecuencia, los siguientes:

**A.** Campo magnético estático: acción sobre partículas o moléculas cargadas (glóbulos rojos, hemoglobina). También, como resultado del movimiento de un cuerpo conductor a través de las isolíneas magnéticas (caso del sanitario en las proximidades de un equipo de imagen por resonancia magnética) ese cuerpo se verá expuesto a corrientes eléctricas inducidas que pueden ser

relativamente intensas, en función de la densidad de flujo magnético del campo atravesado.

**B.** Campos de frecuencias bajas e intermedias: inducción de corrientes, generalmente a densidades supra-fisiológicas, en tejidos conductores expuestos.

**C.** Radiofrecuencias: hipertermia inducida en los tejidos expuestos.

### ALGUNAS APLICACIONES TERAPÉUTICAS DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS DE FRECUENCIAS BAJAS

Existe amplia evidencia clínica y experimental demostrativa de que CEM relativamente débiles y de baja frecuencia pueden ser aplicados con éxito al tratamiento de una variedad de dolencias y lesiones. Esta evidencia es lo suficientemente robusta como para cumplir los requisitos de aprobación de autoridades sanitarias tan exigentes como la U.S. Food and Drug Administration (FDA). Así, numerosas estrategias de tratamiento por CEM de frecuencia baja o muy baja tienen en la actualidad una distribución virtualmente universal. Entre las aplica-

ciones de esos CEM, cabe destacar las siguientes.

### Regeneración de tejido óseo

Hace tiempo que se sabe que la aplicación de CEM pulsados (CEMP) de baja frecuencia es clínicamente eficaz en la estimulación de la consolidación de tejido óseo dañado, sobre todo en casos de fracturas de evolución tórpida o bloqueada. Asimismo, los CEMP se han aplicado con éxito a la reparación de discos intervertebrales desgastados o lesionados, que son causa de la mayoría de los casos de dolor crónico de espalda. Desde que en 1979 la FDA aprobó el uso de CEMP en reparación y cicatrización ósea, millones de pacientes se han beneficiado de ese tipo terapia no invasiva, indolora, de bajo coste comparativo y clínicamente efectiva en casos en los que otros métodos clínicos han fracasado [1].

El hecho de que este tipo de terapia electromagnética se conozca desde hace décadas, ha permitido avanzar en la investigación de algunos mecanismos implicados en los efectos de los CEM débiles. Así, se ha podido determinar qué parámetros



físicos, incluyendo la forma de la señal y la frecuencia, son relevantes en tratamientos de reparación ósea y de otros tejidos. También la amplia casuística clínica ha permitido describir la forma en que los CEMP pueden modular la fisiología de diversas funciones moleculares, celulares y tisulares [2]. En virtud de estos conocimientos se ha postulado que es muy probable que a medida que la investigación experimental proporcione datos sobre la naturaleza de los bioefectos de los CEM, encontraremos combinaciones de señales electromagnéticas con aplicaciones terapéuticas nuevas y diversas.

### **Reparación de heridas**

Los CEMP también se han revelado eficaces en regeneración tisular y reparación de heridas, según muestra la evidencia clínica y experimental. La efectividad clínica de estos campos es particularmente notable en el caso de heridas de evolución tórpida [3]. En función de los parámetros de señal seleccionados y de las condiciones de exposición específicas, los CEMP son aplicables a la reparación de quemaduras y de heridas quirúrgicas, así como a la de úlceras diversas, incluyendo las de epitelio vascular, las de origen diabético o las de contacto o presión [3]. Entre los fenómenos implicados en tales procesos regenerativos, se ha podido constatar que

los campos son capaces de reducir el edema, aumentar el flujo sanguíneo, modular la regulación de los receptores de factores de crecimiento, promover la actividad de neutrófilos y macrófagos y la migración de las células epidérmicas, y aumentar la proliferación de fibroblastos en los tejidos tratados [4].

### **Dolor**

Al igual que ocurre para las aplicaciones descritas arriba, el uso de estrategias de exposición a CEMP sub-térmicos, aplicadas al alivio del dolor agudo y crónico generado por lesiones de tejido conectivo (cartílago, tendón, ligamentos y hueso) o de tejidos blandos asociados con daños articulares, cuenta con el aval de autoridades como la FDA. Tales formas de dolor agudo o crónico han respondido a los CEMP como una alternativa eficaz a los fármacos antiinflamatorios no esteroides. Para una revisión de la evidencia sobre las aplicaciones de CEM al alivio de dolor crónico asociado con la tendinitis, la esclerosis múltiple, el síndrome del túnel carpiano y diversas formas de artritis, [5]. La revisión incluye también análisis sobre el uso de los CEMP para el tratamiento del dolor de cabeza y de migrañas, así como para el alivio de dolores debidos a lesiones de cuello y latigazo cervical, dolor postoperatorio, esguinces y dolor pélvico crónico.

### **Depresión, ansiedad, insomnio**

El uso de los CEM para tratar los síntomas de la depresión y el insomnio, y de trastornos por desánimo o ansiedad, se inició en la década de 1970 y está autorizado por la FDA. La evidencia clínica sobre terapias electromagnéticas aplicadas al tratamiento de los citados desórdenes, ha sido revisada por Shealy et alii [6]. Estos autores constatan, por ejemplo, que la estimulación transcraneal por CEM (MTS) ha resultado en alivio significativo de la depresión en un 85% de pacientes previamente sometidos sin éxito a diversos tratamientos farmacológicos, y que la MTS se ha revelado al menos dos veces más eficaz y libre de efectos secundarios, que cualquier fármaco antidepressivo [7]. Actualmente existe en el mercado aproximadamente una docena de estimuladores por exposición a CEM de muy baja intensidad, considerados clínicamente eficaces en el tratamiento de alteraciones en la regulación de neuroquímicos, como la serotonina y el cortisol, de los que se sabe que están implicados en los trastornos citados.

### **Estrés adaptativo celular/tisular**

Diversos estudios han coincidido en mostrar que la exposición a CEM de muy baja frecuencia y con densidades de flujo magnético muy débiles ( $B \sim 10 \mu T$ ) puede inducir en distintos tipos de células respuestas de estrés adaptativo, que actúan como mecanismo de protección frente a eventuales daños producidos a nivel celular o tisular [8]. La respuesta más comúnmente observada, y que puede ser detectada tras periodos de exposición de tan sólo 20 minutos, es la estimulación de la expresión de proteínas de estrés del tipo de las inducidas por choque térmico (HSP). Las proteínas de estrés permiten a las células combatir daños como los generados en casos de anoxia, propios de ataques cardíacos y accidentes cerebrovasculares. De hecho, se ha mostrado experimentalmente que el pretratamiento con los citados CEM tendría un efecto protector en células de tejido cardíaco sometidas químicamente a bloqueo de la captación de oxígeno.



## APLICACIONES TERAPÉUTICAS DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS RF/MW

Los avances en el conocimiento y utilización de las radiofrecuencias y microondas han sentado las bases para el desarrollo de nuevas aplicaciones médicas de estas RNI. Así, el potencial de uso médico de las RF/MW radica en tres grandes áreas: terapia, diagnóstico y transferencia de información. En el presente artículo abordaremos la primera de dichas áreas, que se basa preferentemente en la acción térmica ejercida por este tipo de señales sobre los tejidos blanco. No obstante, niveles atérmicos o sub-térmicos de RF se aplican cotidianamente en procedimientos de exploración y diagnóstico por resonancia magnética. Por otra parte, estudios recientes han puesto de manifiesto que exposiciones cortas a RF sub-térmicas, moduladas o no a frecuencias bajas, son capaces de ejercer efectos protectores o reparadores a través de la promoción de la síntesis de proteínas de estrés, de la misma forma que lo hacen los campos de baja frecuencia descritos anteriormente. Estudios también recientes han proporcionado evidencias de que parte de los efectos beneficiosos atribuidos a la acción térmica ejercida por tratamientos electrotérmicos con RF, podrían deberse a la propia interacción eléctrica o electromagnética con los tejidos. De hecho, al menos algunos de esos efectos beneficiosos se obtienen también cuando el tratamiento se aplica a niveles de RF atérmicos o sub-térmicos [9]. Tales efectos son de especial interés cuando la hipertermia está contraindicada, como en tratamientos de regiones doloridas o particularmente sensibles, o en pacientes portadores de implantes metálicos.

En cualquier caso, y sin olvidar los aspectos prometedores de sus potenciales efectos sub-térmicos, los actuales usos terapéuticos de las RF/MW se basan preferentemente, como hemos dicho arriba, en el calentamiento de los tejidos. Por ejemplo, se vienen aplicando con éxito RF/MW térmicas en el rango MHz - GHz en dermatología y medicina estética, para corregir problemas de laxitud de la piel, arrugas, celulitis o acné, así como para acelerar la cicatrización postquirúrgica de heridas [10]. En fisioterapia, los efectos

de los tratamientos clásicos como la diatermia para lesiones y dolores de origen muscular y articular, son bien conocidos desde hace tiempo y han sido objeto de literatura abundante y accesible. En el presente artículo hemos optado por enfocarnos en aplicaciones de desarrollo más reciente, para tratamientos clínicos en las disciplinas de cardiología, urología y oncología.

### Trastornos cardiacos

La angioplastia con globo es una estrategia de reparación quirúrgica de un vaso sanguíneo ocluido o estenotado, mediante la inserción a través de una incisión en el cuello o en la pierna, de un catéter con punta inflable. Una vez situado en el lugar de la estenosis el globo se infla, dejando, después de ser retirado, una abertura más amplia para el flujo sanguíneo. Este procedimiento, que evita la cirugía de derivación cardiaca, puede optimizarse mediante el uso de RF/MW a través de la técnica denominada *microwave balloon angioplasty* (MBA). Estos dispositivos utilizan un conjunto de pequeñas antenas incorporadas dentro y alrededor del globo-catéter. Mediante la aplicación de RF/MW a través de las antenas se consigue, en un intervalo de tiempo muy corto, el calentamiento y consiguiente eliminación de la placa que obstruye la luz del vaso [11].

Otra aplicación de RF/MW es el tratamiento de arritmias cardiacas de tipos diversos. El procedimiento implica guiar el catéter a través de venas o arterias, hasta la vía eléctrica responsable de la arritmia, donde se realiza una operación de ablación mediante hipertermia por RF/MW. La señal RF se aplica en forma de corrientes en el rango 100 kHz-10 MHz, entre el electrodo del catéter ( $\varnothing \sim 2.6$  mm) en contacto con el endocardio y una placa o electrodo dispersivo ( $\sim 15 \times 9$  cm) colocado generalmente en la espalda del paciente. La aplicación de frecuencias superiores (MW) mediante el uso de antenas unipolares y helicoidales permite generar niveles de hipertermia mayores y alcanzar tejidos cardiacos más profundos. Estas técnicas de ablación cardiaca alcanzan tasas de éxito del orden de 75-95%, dependiendo del tipo de arritmia tratada [12].

### Trastornos urológicos

La hipertrofia prostática benigna (BPH) es el tumor benigno más común en los hombres, y es la causa más frecuente de síntomas de obstrucción urinaria en sujetos mayores de 50 años. En la BPH la glándula prostática aumenta gradualmente de tamaño, presionando la uretra y dificultando el control de la micción. Las terapias aplicadas tienen como objetivo la disminución del volumen de tejido prostático. La ablación transuretral mediante aguja (TUNA) es un tratamiento endoscópico que utiliza RF para producir lesiones térmicas en el interior del tejido de la próstata [13]. Se realiza mediante la inserción de agujas-antena en la uretra y en los lóbulos laterales de la próstata. Alimentadas con frecuencias  $f \sim 500$  kHz durante cuatro minutos, las antenas calientan los tejidos hasta  $70-100^\circ\text{C}$ , provocando su necrosis por coagulación termoinducida.

Con fines similares se emplea la termoterapia transuretral por microondas (TUMT), que se aplica guiando a través de la uretra hasta alcanzar la próstata, un catéter delgado equipado con un pequeño dispositivo de emisión de MW. Una vez emplazada la antena, la exposición a MW permite destruir por calentamiento el exceso de tejido prostático. Durante el tratamiento se hace circular fluido refrigerante en las inmediaciones de la antena, para evitar que el calor dañe la pared uretral.

### Tratamientos oncológicos

La hipertermia por MW en una técnica aplicada con éxito a miles de pacientes oncológicos, principalmente en casos de cáncer mamario o prostático. La base de esta terapia coincide con la descrita en el apartado anterior; se trata de eliminar o reducir el tamaño de los tumores mediante la hipertermia generada por MW en el tejido tumoral [14]. Las MW pueden aplicarse por procedimientos no invasivos, utilizando aplicadores de guía de onda de uno o más elementos, dependiendo de la superficie a tratar, para inducir hipertermia por calentamiento dieléctrico a nivel cutáneo o en tejidos subcutáneos. En procedimientos invasivos las MW pueden emplearse como estrategia quirúrgica aplican-

do, mediante un conjunto de antenas insertadas en el tejido, altas temperaturas en tumores de tamaño relativamente grande. En estos casos la cirugía suele estar guiada mediante imagen por resonancia magnética, lo que permite monitorizar la correcta aplicación de la hipertermia. También se pueden aplicar MW a más bajas potencias, capaces de elevar la temperatura del tumor a valores de 42-45°C, manteniendo en normotermia los tejidos sanos circundantes durante los aproximadamente 45 minutos que dura cada sesión. Además de dañar a las células cancerosas directamente, la hipertermia inducida en esos casos incrementa el flujo sanguíneo y el suministro de oxígeno en el tumor, provocando un daño adicional a las células cancerosas. Este tipo de tratamiento es compatible, y puede aplicarse alternativa o simultáneamente, con terapias oncológicas como la radioterapia o la quimioterapia [15]. En este último caso, el catéter que sirve de guía al juego de antenas puede utilizarse para la administración del cóctel de onco-táticos químicos.

## CONCLUSIÓN

Este artículo describe sumariamente las aplicaciones clínicas de los CEM que se encuentran más extendidas actualmente. El cáncer, la regeneración del músculo cardíaco, la diabetes, la artritis y los trastornos neurológicos son sólo algunas de las patologías que ya han demostrado responder a tratamientos por CEM. Pero las potenciales aplicaciones terapéuticas de estos campos se extienden mucho más allá de las consideradas aquí. Así, los campos de baja frecuencia se han ensayado con éxito en el tratamiento del asma bronquial, el infarto de miocardio y las úlceras venosas y varicosas. Existen también investigaciones emergentes sobre efectos de los CEM en angiogénesis y sobre cómo estos pueden favorecer la supervivencia de células madre en tratamientos de Alzheimer y Parkinson. Asimismo, diversos estudios han apuntado la posibilidad de la aplicación de CEM para la regeneración de nervios periféricos o para nuevos tratamientos oncológicos. Los distintos tipos de terapias por CEM son simples, seguros y de bajo coste relativo. Además, estas terapias

ofrecen la posibilidad de tratar las patologías subyacentes en lugar de simplemente aliviar los síntomas, y carecen de los efectos secundarios asociados al uso de agentes farmacológicos.

Por todo ello es previsible que en un futuro no lejano, la terapéutica electromagnética tenga un impacto profundo en la salud pública y en los costes asociados.■

- [1]. Wuschek H., von Hehn U, Mikus E., Funk RH. Effects of PEMF on patients with osteoarthritis: results of a prospective, placebo-controlled, double-blind study. *Bioelectromagnetics* 2015, 36:576-585.
- [2]. Pilla AA. Mechanisms and Therapeutic Applications of Time-Varying and Static Magnetic Fields. *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields Third Edition: Biological and Medical Aspects of Electromagnetic Fields*. Barnes FS and Greenebaum B. editors, 2007, page 352.
- [3]. Pilla AA. Mechanisms and Therapeutic Applications of Time-Varying and Static Magnetic Fields. *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields Third Edition: Biological and Medical Aspects of Electromagnetic Fields*. Barnes FS and Greenebaum B. editors, 2007, page 357.
- [4]. Cañedo-Dorantes L., Soenksen L.R., García-Sánchez C., Trejo-Núñez D., Pérez-Chávez F., Guerrero A., Cardona-Vicario M., García-Lara C., Colli-Magaña D., Serrano-Luna G., Angeles Chimal J.S., Cabrera G. Efficacy and safety evaluation of systemic extremely low frequency magnetic fields used in the healing of diabetic foot ulcers-Phase II Data. *Arch Med Res*. 2015, 46:470-8.
- [5]. Markov M.S. Magnetic and Electromagnetic Field Therapy: Basic Principles of Application for Pain Relief. *Bioelectromagnetic Medicine*. Rosch PJ and Markov MS, editors, 2004, page 258.
- [6]. Shealy C.N., Liss S., Liss B.S. Evolution of Electrotherapy: From TENS to Cyberpharmacology. *Bioelectromagnetic Medicine*. Rosch PJ and Markov MS, editors, 2004, page 93-114.
- [7]. Adey W.R. Potential Therapeutic Applications of Nonthermal Electromagnetic Fields: Ensemble Organization of Cells in Tissue as a Factor in Biological Field Sensing. *Bioelectromagnetic Medicine*. Rosch PJ and Markov MS, editors, 2004, page 1.
- [8]. George I., Geddis M.S., Lill Z., Lin H., Gomez T., Blank M., Oz M.C., Goodman R. Myocardial function improved by electromagnetic field induction of stress protein hsp70. *J Cell Physiol* 2008, 216:816-23.
- [9]. Hernández-Bule M.L., Trillo M.A., Úbeda A. Molecular mechanisms underlying antiproliferative and differentiating responses of hepatocarcinoma cells to subthermal electric stimulation. *Plos One* 2014, 9:e84636
- [10]. Lolis M.S., Goldberg D.J. Radiofrequency in cosmetic dermatology: A Review. *Dermatol Surg* 2012, 38:1765-1776.
- [11]. Zhang Q.Q., Zu M.H., Xu H., Gu Y.M., Wang W.L., Gao Z.K. Combining angioplasty with percutaneous microwave ablation for treating primary Budd-Chiari syndrome associated with hepatocellular carcinoma in two patients: A case report. *Oncol Lett* 2013, 6:612-616.
- [12]. Basu S., Nagendran M., Maruthappu M. How effective is bipolar radiofrequency ablation for atrial fibrillation during concomitant cardiac surgery? *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2012 15:741-8.
- [13]. Le Gal S., Fouques Y., Mallick S., Taksin L., Le Toquin-Bernard S., Frachet O., Bensadoun H. Treatment of benign prostatic hyperplasia by radiofrequency (TUNA): a monocentric study of 28 cases treated in ambulatory surgery. *Prog Urol* 2009, 19:327-32.
- [14]. Kok H.P., Wust P., Stauffer P.R., Bardati F., van Rhon G.C., Crezee J. Current state of the art of regional hyperthermia treatment planning: a review. *Rad Oncol* 2015, 10:196-210
- [15]. Gadaleta-Caldarola G., Infusino S., Galise I., Ranieri G., Vinciarelli G., Fazio V., Divella R., Daniele A., Filippelli G., Gadaleta Cd. Sorafenib and locoregional deep electro-hyperthermia in advanced hepatocellular carcinoma: A phase II study. *Oncol Lett* 2014, 8:1783-1787.