



LAS RADIACIONES Y EL AMBIENTE

Heredia-Rojas, J.A.¹, O. Heredia-Rodríguez¹, A. O. Rodríguez de la Fuente^{*1}, L. E. Rodríguez-Flores², M. A. Santoyo-Stephano¹ y E. Castañeda-Garza¹.

¹Departamento de Ciencias Exactas y Desarrollo Humano, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León.

²Departamento de Patología, Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Nuevo León *Autor de correspondencia: abraham.rodriguezdz@uanl.edu.mx



**Palabras clave: Radioecología,
radiaciones ionizantes,
radiaciones no-ionizantes,
Radiobiología.**

RESUMEN

El advenimiento de la era nuclear, aunado al desarrollo de diversas tecnologías sobre todo en lo referente a telecomunicaciones, ha producido un incremento generalizado de diversos tipos de radiaciones en nuestro ambiente. Además, el ya conocido decremento de la capa de ozono, provoca cambios tan rápidos en el entorno radiológico que no hay a la fecha suficientes estudios que demuestren concluyentemente el potencial riesgo que estas radiaciones representan para los seres vivos. Las Ciencias Biológicas han llegado a tal grado de especialización, que actualmente existe una rama de la Ecología, la así llamada "Radioecología" que se ocupa del estudio del impacto de la energía provocada por diversos tipos de radiaciones en los ecosistemas. En el presente artículo, presentamos información con objeto de mostrar una panorámica acerca de la influencia de las radiaciones en los organismos y su ambiente. Basándonos en estudios recopilados de la literatura, e investigaciones llevadas a cabo en nuestro laboratorio, se tratarán de manera general las consecuencias que tiene el incremento de la cantidad de radiación en la biósfera.

INTRODUCCIÓN

La radiación es un factor físico del ecosistema que ha estado presente desde la formación del planeta. Los sistemas biológicos han desarrollado una variedad de mecanismos adaptativos que han permitido la supervivencia de las especies frente a la exposición a esta radiación de origen natural (Møller y Mousseau, 2013). Por otro lado, actualmente existe una diversidad de fuentes de radiación no natural derivada de la actividad humana. La presencia de esta radiación antropogénica ha planteado la pregunta: ¿Hasta qué punto los organismos podrán adaptarse a los cambios que estas radiaciones producen en la fisiología celular?

Toda radiación produce un efecto al ser absorbida por los materiales, aparentemente no dañino en el momento. Sin embargo, la segunda ley de la termodinámica establece que cualquier cantidad de energía que ingresa a un sistema trae consigo un aumento en el desorden (entropía) del mismo, lo que conduce a una disminución en la energía libre necesaria para todas las funciones biológicas (Bor-Sen et al., 2015).

Actualmente, hay estudios que indican el deterioro de una variedad de especies biológicas que se atribuye a la excesiva carga energética provocada por diversas clases de radiaciones (Jeggio y Lobrich, 2006). Un problema adicional, radica en el hecho de que la mayoría de las radiaciones no son sensorialmente perceptibles por el ser humano, es decir, son cantidades físicas a las que nuestros sentidos no responden y solamente con instrumental especializado podemos detectar su presencia.

Dado lo anterior, decidimos presentar en este artículo una panorámica general del impacto ecológico de diversos tipos de radiaciones, desde las de alta carga energética, producto del decaimiento radiactivo, hasta aquéllas que portan una cantidad muy pequeña de energía, como las relacionadas con telecomunicaciones, sub-estaciones eléctricas, y líneas de alta tensión, pero a las que también se les atribuyen efectos biológicos relevantes.

TIPO DE RADIACIONES

La radiación se define como la propagación de energía, ya sea en forma de ondas o partículas a través del espacio. Por su modo de interacción con la materia, las radiaciones se agrupan en **ionizantes** y **no-ionizantes**. Las primeras, tienen ese calificativo debido a su capacidad de formar iones a partir de los átomos y moléculas con los cuales interactúan. Por su parte, las no-ionizantes no son capaces de inducir la ionización de los materiales que impactan, pero al interactuar con la materia producen efectos térmicos y modificación del entorno electromagnético del sistema biológico (Swiderek, 2006).

Entre las radiaciones ionizantes, se cuentan aquellas que provienen del fenómeno de radiactividad, propiedad que se define como la emisión de masa y/o energía por un átomo inestable, e incluyen a los rayos Alfa, Beta y ondas electromagnéticas Gamma, rayos X producidos en máquinas de rayos catódicos, y también aquella radiación proveniente del espacio sideral denominada "Radiación Cósmica". Al respecto de ésta última, se sabe que la radiación originada en el espacio está conformada por ondas electromagnéticas más una gran variedad de partículas ionizantes, y se ha considerado que los rayos cósmicos son las radiaciones ionizantes más penetrantes de las conocidas hasta el momento. La incidencia de radiación cósmica en el planeta está directamente influenciada por variables geográficas como la altitud y latitud, se sabe que la intensidad de esta radiación se incrementa proporcionalmente al aumentar estas variables (Maalouf et al., 2011).

Las sustancias que emiten radiaciones ionizantes en nuestro medio se denominan radioisótopos, y son elementos inestables que se caracterizan por tener un número desbalanceado de neutrones con respecto a los protones en su núcleo atómico. Generalmente son isótopos de número atómico alto, en sí, todos los elementos con número atómico 83 en adelante son radiactivos. Por su parte, hay radioisótopos ligeros que por tener un desbalance en sus neutrones pueden ser también radiactivos, tenemos por ejemplo al primer elemento, el Hidrógeno, que lo podemos encontrar como Tritio o Hidrógeno-3 y que es inestable. Solo los elementos inestables emiten radiaciones, ningún elemento estable lo hace, a éstos últimos se les denomina isótopos no-

radiactivos. Es por lo tanto importante, el conocer la tabla periódica de los elementos, saber cuáles son considerados radiactivos y por lo tanto de potencial peligro debido a la radiación que emiten, ya que muchos de ellos se encuentran en forma natural en diversos minerales como la Uraninita y la Monacita, ricos en Uranio y Torio respectivamente (Bonin y Tsilanizara, 2017). Al respecto, es pertinente mencionar que si se es aficionado a la espeleología (exploración de grutas y cavernas) se deberá poner especial atención al coleccionar rocas, sobre todo de colores oscuros y de grandes profundidades, ya que pudiera tratarse de material sedimentario que ha incorporado diversos radioisótopos. Debido a que nuestros sentidos físicos no detectan la presencia de la radiación proveniente de la radiactividad, será necesario utilizar instrumental especializado para saber si las rocas en cuestión emiten radiación.

Por otro lado, las radiaciones no-ionizantes incluyen la mayor parte del espectro electromagnético y abarcan las de los campos electromagnéticos (CEM) producidas por muy diversos aparatos eléctricos, líneas de conducción y sub-estaciones eléctricas, a éstas se les ha denominado radiaciones electromagnéticas de frecuencia extremadamente baja (entre 50 y 60 Hertz para el caso de la electricidad doméstica). Se cuentan también como no ionizantes; las de telefonía, incluyendo desde luego a la telefonía móvil, las de radio, ondas de radar, microondas, infrarrojas o también llamadas caloríficas, la luz visible con los siete colores del espectro (rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo y violeta), y la luz ultravioleta. Una atención especial tiene la radiación ultravioleta (UV), ya que en este rango de longitudes de onda es donde se hace la separación entre la no-ionizante y la ionizante (Figura 1). En la escala del espectro electromagnético, se considera que la UV es no-ionizante, debido a que no forma iones con todos los materiales que impacta. Sin embargo, por el hecho de hacer blanco en moléculas informacionales de las células, como son los ácidos nucleicos y las proteínas y provocar desplazamiento de electrones en éstas, es que se les considera de gran importancia radiobiológica (Robson et al., 2015).

EFFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

Muy poco tiempo después de que el profesor alemán Wilhelm Conrad Roentgen, trabajando con un tubo de

rayos catódicos descubriera los rayos X en 1895 (Figura 2), de los experimentos de Becquerel en 1896, y de los esposos Curie en 1898 en Francia, se sospechó que estas fuentes de radiación causaban efectos biológicos indeseables aun y cuando en ese entonces poco o casi nada se sabía de la naturaleza física de estas emisiones. Para 1906, los trabajos de los franceses Bergonié y Tribondeau condujeron al establecimiento de categorías de radio-sensibilidad celular y se concluyó desde entonces que sería preciso protegerse en contra de esta energía pues era capaz de enfermar a los seres humanos (Yalemar et al., 2001). Actualmente, se sabe que el efecto primario de la radiación sobre la materia viva consiste en la ionización del agua, la así llamada "Radiólisis del agua" representa un problema serio toda vez que esta molécula es la más abundante en los seres vivos. Una vez ionizada el agua, se forman radicales libres que afectan muchos procesos metabólicos que llegan a producir desde bloqueos de reacciones químicas, hasta mutaciones en el ADN y desnaturalización de proteínas. Se ha estudiado a profundidad el efecto de estos radicales libres en las diversas funciones orgánicas, y ahora se atribuye a ellos una serie de enfermedades degenerativas, incluyendo el envejecimiento prematuro de las especies y el cáncer. Asimismo, los radicales libres ocasionan una serie de disfunciones celulares, que a su vez trastornan la delicada homeostasia de los sistemas biológicos provocando su degeneración y muerte (Joshi et al., 2012).

Por otra parte, han sido muy bien estudiados los efectos genéticos de la radiación ionizante y por esto se le considera un agente clastogénico (rompe los cromosomas en el núcleo de las células eucarióticas), mutagénico (altera la secuencia del material genético), y teratogénico (puede producir malformaciones congénitas). Además, se le considera un agente oncogénico, ya que este tipo de radiación es capaz de inducir una diversidad de neoplasias (Brehwens et al., 2010).

EFFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN POBLACIONES HUMANAS

Después de la segunda guerra mundial, con el dominio de la energía nuclear, durante la década de 1950 se empezó a utilizar la expresión "era nuclear" pensando que con esta energía se substituirían todas las fuentes energéticas convencionales. La era nuclear empezó entonces en el momento en que se tuvo control de la reacción nuclear en cadena que desarrollara inicialmente en 1942 el físico italiano Enrico Fermi, hecho que posteriormente condujo a la fabricación de la llamada bomba atómica, que con más propiedad debería llamarse "bomba nuclear", ya que implica el proceso de fisión del núcleo del

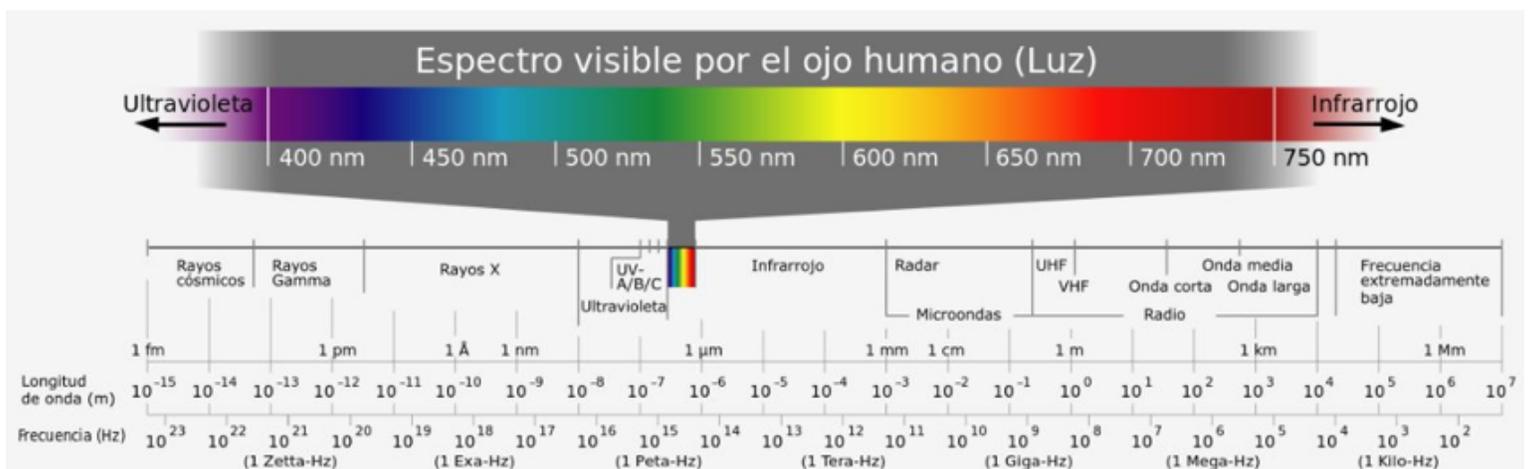


Figura 1. Diagrama del espectro electro-magnético. Se muestran los tipos de radiación electromagnética ordenados por longitud de onda y frecuencia. Además de las radiaciones de tipo ondulatorio, existe una diversidad de partículas que actúan asimismo como radiaciones, tal y como se explica en el texto.

átomo. Después de la prueba secreta y exitosa, de la explosión de la primera bomba atómica el 16 de Julio de 1945 en el desierto de Nuevo México en los Estados Unidos de América, el mundo conocería el poder nuclear con dos acontecimientos que cambiaron el rumbo de la historia humana; las detonaciones de armas nucleares en las ciudades japonesas de Hiroshima, el 6 de agosto de 1945, y en Nagasaki el 9 de agosto del mismo año (Figura 3). En esos ataques nucleares, miles de personas murieron instantáneamente carbonizadas en una hoguera de la que no se tenía ningún precedente en la historia de la humanidad. Otros tantos miles murieron por los efectos de la onda de choque, que es un intenso viento provocado por la fuerza explosiva. El aire adquirió una rigidez como de sólido, destruyendo todo alrededor y no dejó prácticamente ninguna edificación sin dañar en un radio de aproximadamente 20 kilómetros. En total, alrededor de cien mil personas murieron instantáneamente, la mayoría afectados por el calor, otros golpeados por las ondas de choque o por los fragmentos de los edificios destruidos que actuaban como proyectiles. Varios miles más murieron en los días posteriores a la detonación, y para diciembre de 1945 habían fallecido a consecuencia de esta catástrofe 140,000 seres humanos. Aparte de esto,

cabe mencionar que los efectos de la radiactividad generada en la explosión, volvió prácticamente inhabitable la zona y los efectos genéticos de la radiación en las personas se mantuvieron por varias generaciones (Cullings et al., 2017).

Pese a esta terrible experiencia, las investigaciones sobre armas nucleares no cesaron, por el contrario, se incrementaron y se inició así la llamada "guerra fría" que involucraba el dominio militar de las dos grandes potencias mundiales de ese tiempo; los Estados Unidos de América y la extinta Unión Soviética. Para 1952 se comprobó que era posible fabricar una bomba de fusión nuclear, es decir, que la fusión de dos átomos de hidrógeno era factible y que esto producía la liberación de una energía mil veces mayor que la liberada en la fisión atómica. La así llamada "Bomba-H" o bomba de hidrógeno, fue probada exitosamente en la isla Bikini en octubre de 1952. Su poder destructivo fue de 10 megatonnes, es decir el equivalente explosivo de 10 millones de toneladas de dinamita. Esta sola bomba que destruyó la pequeña isla donde se probó, evaporándola completamente y desapareciéndola del mapa geográfico, tuvo un poder destructivo mayor que las bombas arrojadas durante la segunda guerra mundial (Nagataki, 2016).



Figura 2. Los rayos X fueron el primer tipo de radiación ionizante descubierto por el profesor alemán Wilhelm Conrad Roentgen en 1895. Casi inmediatamente después de este hallazgo, esta radiación fue utilizada para imagen diagnóstica y diversos usos médicos, y hasta nuestros días se sigue usando. Sin embargo, ahora se sabe que todas las radiaciones ionizantes tienen diversos efectos biológicos que incluyen mutaciones y carcinogénesis

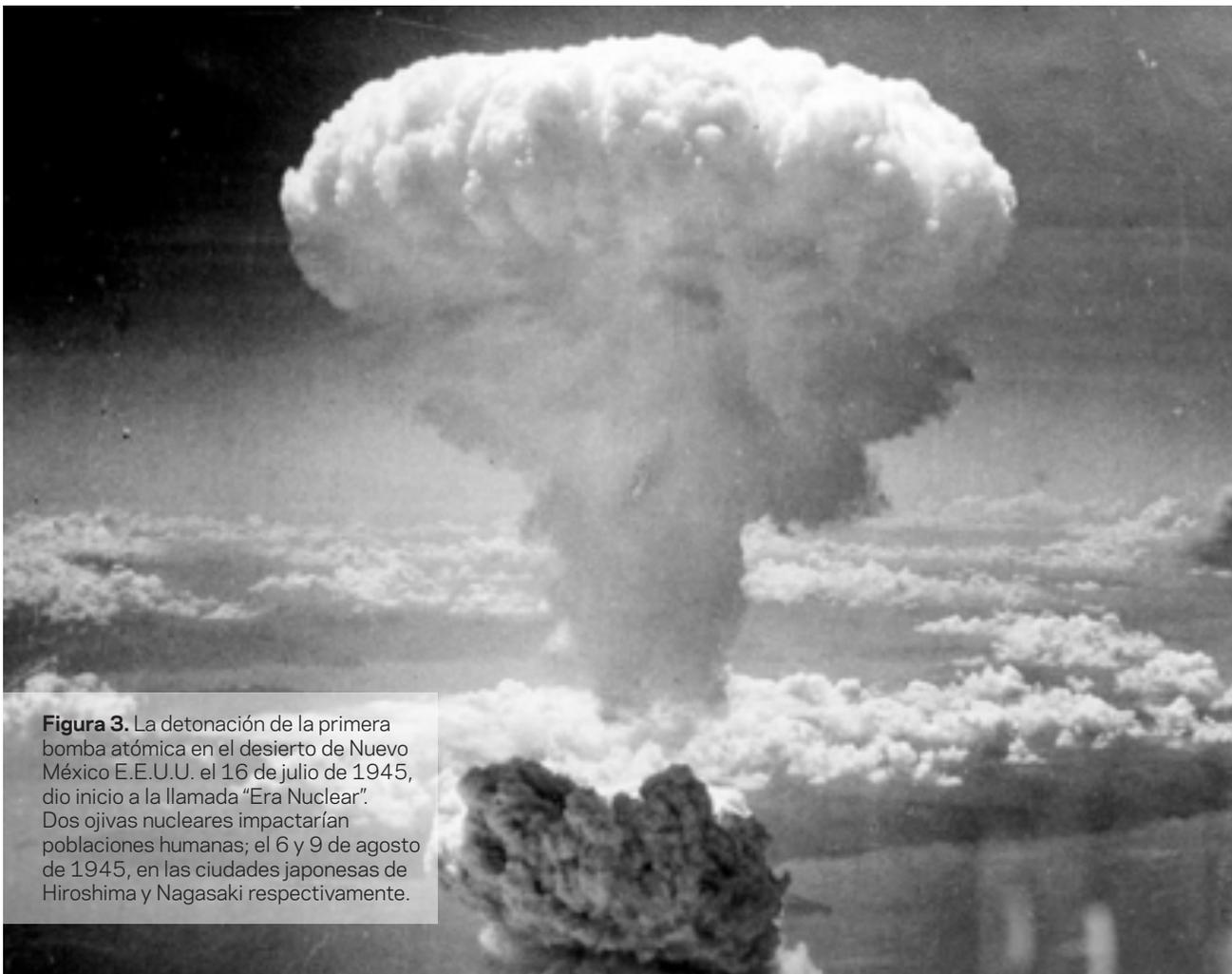


Figura 3. La detonación de la primera bomba atómica en el desierto de Nuevo México E.E.U.U. el 16 de julio de 1945, dio inicio a la llamada “Era Nuclear”. Dos ojivas nucleares impactarían poblaciones humanas; el 6 y 9 de agosto de 1945, en las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki respectivamente.

Por otro lado, también en la década de los 1950's hubo algunos incidentes sobre todo en plantas nucleoelectricas que provocaron exposición accidental en humanos. Sin embargo, el accidente nuclear más importante se produjo en 1986, cuando un reactor de la central nuclear de Chernobyl en Ucrania sufrió un calentamiento que terminó por colapsar la tapa del reactor liberando al ambiente cien veces más radiactividad que la generada por las explosiones atómicas de Japón. Este accidente trajo muy graves consecuencias para los ecosistemas, no solo en la zona sino prácticamente globales, la nube radiactiva dio la vuelta al mundo y afectó lo mismo a campos de cultivo con la consecuente contaminación de los alimentos, como a cuerpos de agua incluyendo los océanos (Jaworowski, 2010). Estas catástrofes nucleares suelen ser de enorme repercusión en la cadena alimenticia de la biósfera, y sus efectos se mantienen por mucho tiempo debido a que los isótopos radiactivos suelen tener vidas medias largas, es decir un tiempo prolongado en el que se mantienen emitiendo radiaciones ionizantes.

En vista de lo anterior, se deduce que es necesario contar con medidas preventivas para evitar sobreexposiciones a las radiaciones ionizantes. Desde los primeros años del siglo pasado, comenzaron a

establecerse medidas de seguridad radiológica y nuclear que a la fecha garantizan que una persona que requiera el manejo de radioisótopos no reciba más energía de la que el organismo es capaz de absorber y aun así reparar los daños potencialmente ocasionados. Considerando que todos recibimos radiaciones ionizantes de fuentes minerales (radioisótopos) o de la ya mencionada radiación cósmica, suponemos entonces que hay una “radiación de fondo” a la que definitivamente estamos adaptados ya que hemos vivido con ella prácticamente desde la formación del planeta. Los factores prácticos que se manejan en la seguridad radiológica son: Distancia, Tiempo y Blindaje. Esto es, en el caso de la *distancia*, el alejarse de la fuente emisora nos garantiza una disminución de la dosis que es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Por su parte, el *tiempo*, se refiere a que entre menos períodos de exposición continua tengamos, menor será la probabilidad de sufrir un efecto biológico por radiación. En el caso del *blindaje*, se manejan diversas barreras protectoras que detienen o reducen la energía de las radiaciones, por lo general se utilizan metales pesados como el plomo, pero actualmente hay una variedad de materiales incluyendo acrílicos, parafina, y hasta contenedores de agua, para neutralizar el efecto de la emisión radiactiva (Parikh et al., 2017).

Existen organismos internacionales que se encargan de establecer la normativa en seguridad radiológica; la Comisión Internacional de Radio-Protección (ICRP por sus siglas en inglés) y la Agencia Internacional de Energía Atómica, quienes basados en estudios científicos establecen las dosis máximas permisibles (DMP) de exposición a radiación que un ser humano puede recibir sin sufrir daño aparente. En México, el organismo regulador de la energía nuclear es la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) que depende de la Secretaría de Energía. En un consenso mundial, se establece que la DMP para el ser humano es de 50 mSv/año (el Sv es una unidad de absorción de radiaciones ionizantes y es específica para el humano. 1Sv = 100 rems, y 1 rem es el equivalente del Roentgen para el hombre). Con referencia a lo anterior, la dosis de 50 mSv (5 rems por año) es realmente baja, si consideramos que un humano puede morir en un lapso de 30 días, pero solo si recibiera de 250 a 400 rems de rayos X o Gamma irradiado de cuerpo entero (Gifford, 1989).

EL PROBLEMA DE LA PRECIPITACIÓN RADIATIVA

El polvo radiactivo que cae a la tierra después de que se realizan pruebas nucleares se designa como precipitación radiactiva (fall-out). Estos materiales se mezclan con partículas que naturalmente existen en la atmósfera originando un coctel tóxico que con la lluvia caerá a tierra tarde o temprano (Libby, 1955). Esta radiactividad se adhiere al estrato vegetal donde producirá no solo daño por radiación en el tejido de las plantas, sino que podrá ser ingerida por animales herbívoros incorporando así los radioisótopos a la cadena alimenticia. Debido a que los isótopos radiactivos acumulados en el organismo no son biodegradables, se produce el llamado fenómeno de "Magnificación Biológica" lo que produce una cantidad creciente de isótopos acumulados que puede llegar a niveles tróficos más altos, y si consideramos que el ser humano es un consumidor final en la cadena alimenticia, tendremos como resultado que la concentración de las sustancias radiactivas será potencialmente peligrosa cuando éste ingiera leche o carne de animales contaminados con esta precipitación radiactiva. Como un ejemplo crítico mencionaremos el caso del estroncio-90, que es un radioisótopo muy común en la atmósfera y que tiene un comportamiento químico parecido al del calcio.

Una vez que va siendo concentrado al pasar a través de diferentes niveles de la cadena alimenticia, pasa al ser humano en concentraciones consideradas de alta radiotoxicidad. Si consideramos que el estroncio-90 está concentrado primordialmente en la leche de animales que previamente pastaron en zonas contaminadas, y que los niños son los que más consumen este alimento, tendremos una alta concentración del radioisótopo en el producto. Ahora bien, uno de los destinos finales del calcio es el hueso, y en este caso el estroncio podría ocupar el lugar de este catión bivalente en el tejido óseo de los niños predisponiéndolos a leucemias al verse alterada la médula ósea. La cantidad de radioisótopos de precipitación que penetra en las cadenas de alimentos y es transferida finalmente al hombre, dependerá no solo de la cantidad recibida del aire, sino también de la estructura del ecosistema y del carácter de sus ciclos biogeoquímicos. En términos generales, entrará una porción mayor de precipitación radiactiva en medios pobres en elementos nutritivos. Por el contrario, en los medios ricos, las elevadas capacidades de intercambio y almacenamiento diluyen la precipitación ya que las plantas tienen una absorción relativamente pequeña de las sustancias radiactivas, de ahí la importancia de mantener nuestros ecosistemas estables y no alterarlos indiscriminadamente (Besson et al., 2009).

USOS PACÍFICOS DE LA ENERGÍA NUCLEAR

A pesar de los riesgos y el peligro potencial que representa una instalación donde hay isótopos radiactivos y de las aplicaciones bélicas destructivas, también hay muchas aplicaciones benéficas de la energía nuclear aparte de la ya mencionada generación de energía eléctrica. De particular aplicación son aquellas relacionadas con la biomedicina. Hay una diversidad de terapias que emplean radiaciones ionizantes, sobre todo para el tratamiento del cáncer. Asimismo, una variedad de pruebas diagnósticas no invasivas que emplean pequeñas cantidades de radiactividad y que han mostrado ser bastante toleradas por el paciente. Por otra parte, en ciencias de la tierra y agronómicas son incontables los usos de esta energía. Desde la determinación de edades fósiles utilizando el llamado método del radio-carbono, hasta el denominado método del radio-trazador, en el que se marcan compuestos de interés particular y se rastrean por su emisión radiactiva con el fin de conocer su ruta metabólica. Así también, el control de insectos

dañinos, esterilizando machos en fase de pupa para posteriormente liberarlos al ambiente y que éstos compitan sexualmente con machos no irradiados y así controlar poblaciones de un modo más natural, sin necesidad de aplicar insecticidas (Chang et al., 2015).

EFFECTOS BIOLÓGICOS Y AMBIENTALES DE LAS RADIACIONES NO-IONIZANTES

Aunque un poco menos estudiadas, se sabe que las radiaciones no-ionizantes tienen efectos biológicos, en algunos casos como el de la luz ultravioleta, muy bien documentados (Alexieva et al., 2001; Hollósy, 2002; Sarghein et al., 2011). La principal fuente natural de este tipo de radiaciones, que como anteriormente se comentó incluyen una gran parte del espectro electromagnético, son las estrellas. El sol, comprende en su espectro en forma general; un 45% de luz visible, otro 45% de luz infrarroja o también llamada "ondas de calor" y un 10% de UV. Con solo este 10% de radiación UV que llegara íntegramente a la superficie terrestre sin ser apropiadamente filtrada, sería suficiente para eliminar prácticamente cualquier tipo de vida como la conocemos actualmente en la plataforma continental. En todo caso, si se mantuvieran formas vivas, serían aquellos organismos acuáticos, ya que el agua es capaz de absorber la mayoría de las longitudes de onda de la radiación (Bancroft et al., 2007).

Para evitar que las longitudes de onda UV, y más cortas lleguen al planeta, existe en la estratósfera de La Tierra una zona de oxígeno triatómico que es llamada "capa de ozono" y que detiene prácticamente todas las radiaciones de longitud de onda igual o menor a 287 nanómetros, espectro que comprende las formas más peligrosas de radiación UV. Esta capa atmosférica que se localiza a una altitud de 20,000 metros, está siendo actualmente amenazada por actividades antropogénicas que promueven su destrucción (Boucher, 2010). Los gases llamados clorofluorocarbonos, que se utilizan principalmente como gases refrigerantes, destruyen rápidamente el ozono adelgazado la capa con la consecuente entrada de mayores cantidades de radiación UV y otras ondas electromagnéticas, incluso ionizantes, como son los rayos cósmicos anteriormente mencionados (Figura 4).

Mucho se ha publicado al respecto del debilitamiento de este escudo de ozono, y a la fecha se sabe que hay zonas

principalmente hacia el hemisferio sur, en particular la Antártida, donde este gas casi ha desaparecido provocando daños a los organismos por sobre-exposición a estas longitudes de onda corta (Newman, 2009). El aumento de patologías de la piel en diversas latitudes, confirman el hecho de que el espectro solar se ha modificado drásticamente y que definitivamente se deberán tomar medidas antes de que la radiación del sol cause más estragos. En particular, algunos tipos de cáncer de piel como el melanoma, se ven incrementados cuando el ADN celular es afectado en forma directa por la radiación UV. Además, se sabe que el envejecimiento prematuro de la piel e incluso efectos sobre el sistema inmune, se derivan de una exposición indiscriminada al sol. Para prevención, se recomienda tomar las debidas precauciones en zonas de alta insolación, donde los niveles de radiación UV son grandes. En latitudes medias, por ejemplo, evitar exponerse entre las 11:00 de la mañana y 4:00 de la tarde. Se debe de considerar también el hecho de que la irradiación solar a grandes altitudes tendrá un efecto mayor, toda vez que es más intensa, ya que a nivel del mar la radiación va siendo filtrada por partículas atmosféricas atenuando en cierta medida su intensidad. El problema con el llamado "sol de montaña" es que, al reducirse la temperatura por efecto de la altitud, tenemos la tendencia a no sentir el calor del sol y por lo tanto corremos el riesgo de sobre-exponernos a radiaciones UV altamente intensas y penetrantes. Por su parte, el empleo de bloqueadores solares que incluyen un factor de protección solar (FPS) y que es un valor indicador del poder de protección, es una medida preventiva casi obligada en estos tiempos. Este factor no deberá ser menor de 40, de acuerdo a especificaciones de asociaciones dermatológicas internacionales. En ningún caso deberá confundirse el uso de un bronceador, que tiene un efecto más bien cosmético, con el de un producto que contiene bloqueador solar. Un bloqueador contiene compuestos químicos que comprometen a la radiación en una reacción fotoquímica, evitando su penetración a la piel y su potencial efecto sobre el ADN, ARN y las proteínas celulares (Osterwalder et al., 2014).

RADIACIONES ELECTROMAGNÉTICAS DE BAJA FRECUENCIA

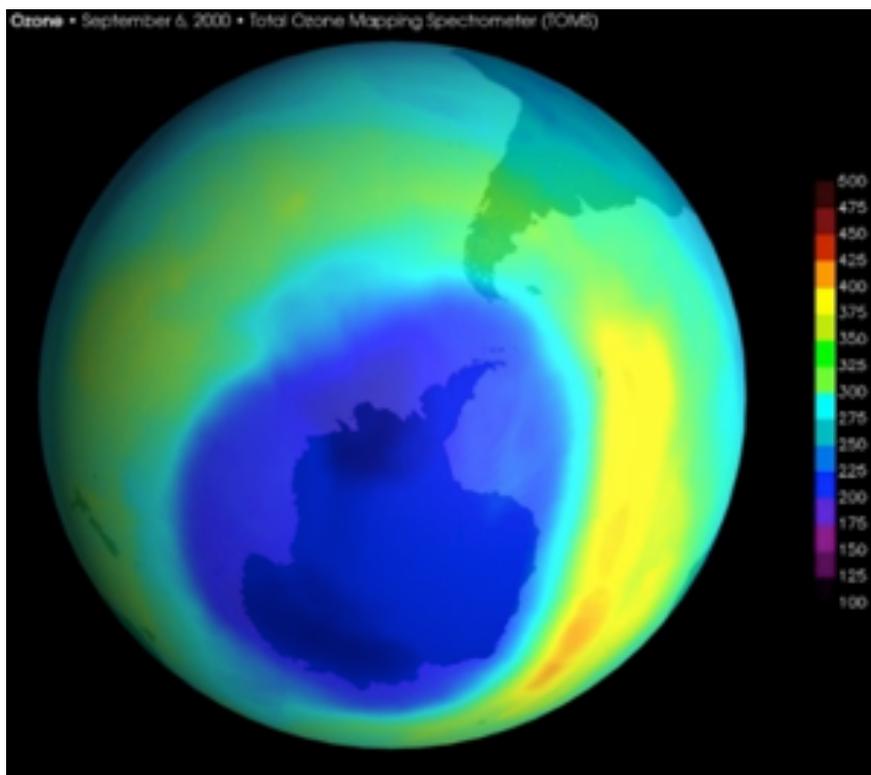
Como anteriormente se mencionó, dentro de las radiaciones no-ionizantes hay una porción del espectro que incluye radiaciones de frecuencia extremadamente baja, del orden de 0 - 300 Hertz y donde se ubican radiaciones tan comunes en

nuestro medio debido a la conducción de corrientes eléctricas. Desde que el hombre apareció en el planeta, ha estado expuesto al campo magnético de la tierra y a los provenientes del espacio exterior, los que tuvieron y aún hoy tienen influencia sobre los sistemas biológicos. Sin embargo, como una de tantas consecuencias que conlleva el aumento en el uso de la energía eléctrica, en estos últimos años el ser humano está cada vez más expuesto a campos electromagnéticos (CEM). Asimismo, el incremento en las telecomunicaciones provoca que tengamos más contacto con electromagnetismo inducido, en forma muy particular por la telefonía móvil.

A finales de los años setenta, aparecieron informes científicos que sugerían la asociación entre CEM y cáncer, en particular con leucemias infantiles (Wertheimer y Leeper, 1979; Pool, 1990). A partir de entonces, se han llevado a cabo una gran cantidad de estudios, tanto epidemiológicos como de laboratorio, para tratar de establecer una relación entre la exposición a este tipo de radiaciones y enfermedad en seres humanos (Zhang et al., 2016). En un consenso general, se acepta que los CEM son capaces de alterar diversas funciones en los organismos, pues debido a su composición electrolítica, los seres vivos son por lo general buenos conductores de la electricidad. A través de las membranas celulares y de los fluidos corporales, existen corrientes iónicas que al verse alteradas conducen a disfunción celular. Además, en los seres vivos existen estructuras magnéticamente influenciadas

como los radicales libres, que tienen gran importancia en el origen de una gran diversidad de enfermedades degenerativas y envejecimiento humano. En nuestro laboratorio, hemos realizado diversas investigaciones que sugieren que los CEM de 60 Hz de frecuencia son capaces de alterar el comportamiento celular; incrementando la proliferación de linfocitos humanos (Heredia-Rojas et al., 2001), modificando la respuesta inmune (Valadez-Lira et al., 2017), actuando como agente citotóxico (Rodríguez de la Fuente et al., 2008), alterando la expresión génica *in vitro* (Rodríguez-De la Fuente et al., 2009) e *in vivo* (Rodríguez-De la Fuente et al., 2012). Por otro lado, también hemos observado que en algunas células de mamífero los CEM no producen efectos significativos (Heredia-Rojas et al., 2004). Sin embargo, el número creciente de estudios cuyos resultados indican efectos potencialmente dañinos atribuidos a esta clase de radiaciones, nos debe poner en alerta para en la medida de lo posible, reducir o limitar la exposición de seres vivos a estas energías. Además, es importante recalcar que cualquier cambio externo en el ambiente eléctrico modificará al fin de cuentas los delicados procesos bioeléctricos del organismo. Para el caso de estas radiaciones, el blindaje es mucho más complicado, y aunque de hecho

Figura 4. La capa de Ozono situada en la estratósfera terrestre, actúa como un escudo protector contra radiaciones potencialmente peligrosas que de otra forma llegarían a la superficie del planeta. En el gráfico se aprecia el "agujero" en la capa de ozono medido desde satélites. Los códigos de color indican la concentración del ozono: La máxima, en naranja, la mínima, en violeta. Inicialmente se detectó una drástica disminución del ozono en el hemisferio sur, en particular en la Antártida.



existen materiales que son capaces de desviar estas energías, muchos de ellos aún están en estudio. Lo que sí se puede aplicar, y como anteriormente se explicó para radiaciones ionizantes, son los factores de *distancia* y *tiempo*, ya que también esta radiación disminuye de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, y entre menos tiempo se esté en contacto con la fuente, menos será el efecto biológico.

Por otra parte, es de gran importancia en los ecosistemas el campo geomagnético, ya que todos los seres vivos se desplazan en el seno de un campo magnético de enormes dimensiones como el terrestre. Debido a esto, se induce una diferencia de potencial que puede alterar su motilidad. Aunque el campo geomagnético es relativamente débil, estos efectos se han observado en elasmobranchios. Se sabe que los tiburones y rayas tienen mecanismos basados en la inducción electromagnética con el fin de orientarse y localizar a sus presas. También se sabe que las aves migratorias poseen un mecanismo de orientación para la navegación basado en la generación de potenciales eléctricos inducidos electromagnéticamente (Wiltshko y Wiltshko, 2005). De igual forma, se ha observado que algunos microorganismos, particularmente bacterias, tienen la capacidad de orientar su movimiento en respuesta a un campo magnético externo, propiedad llamada "magneto-tactismo". Estas bacterias contienen una o dos cadenas intracelulares ricas en partículas de hierro. Asimismo, se han descrito propiedades de magneto-sensibilidad para una gran diversidad de insectos migratorios y aún se ha propuesto que el ser humano responde a orientación magnética y que el punto magneto-receptor se localiza en depósitos ferromagnéticos del hueso vomero-nasal, aunque esta observación aún es controversial (Belova y Acosta-Avalos, 2015).

USOS BENÉFICOS DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA NO-IONIZANTE

Es bien conocido actualmente, que los CEM pueden producir una variedad de efectos benéficos en los sistemas biológicos. Los campos magnéticos pulsantes, por ejemplo, son utilizados con bastante eficacia en la reparación de fracturas óseas (Androjna et al., 2014). Se ha informado también, que la calcificación del hueso es promovida tanto por campos eléctricos como por magnéticos, favoreciendo en casos de osteoporosis (Hu et al., 2015). Asimismo, se ha reportado la regeneración de tejidos aplicando CEM de 60 Hz. Muchos de estos procedimientos están aprobados y regulados internacionalmente. Se ha presentado también evidencia de que ciertas frecuencias de radiación electromagnética del tipo de las radiofrecuencias son capaces de eliminar microorganismos patógenos de los alimentos (Qin et al., 1996).

Para otros tipos de radiaciones no-ionizantes, hay también muchas aplicaciones. Los rayos infrarrojos, por su parte, se usan en fisioterapia y diversos procedimientos quirúrgicos y estéticos (Rutkowski et al., 2011). También la ya comentada radiación UV, tiene aplicaciones microbicidas toda vez que la gran mayoría de los microorganismos son muy eficientemente inactivados por este tipo de radiaciones (Ko et al., 2001). Por otra parte, son muy bien conocidas las aplicaciones de las microondas, no solamente en la industria alimentaria, sino también en biomedicina (Shruthi et al., 2013).

CONCLUSIONES

En base a lo anteriormente expuesto, se puede afirmar que nuestro entorno radiológico se ha modificado drásticamente sobre todo en los últimos 60 años, debido principalmente al irresponsable comportamiento de la especie humana. Actualmente, mucho se habla y poco se hace al respecto del llamado “desarrollo sustentable”, es decir crecer, pero con planeación, considerando la calidad del ambiente y los recursos bióticos para las futuras generaciones. Crecer usando, y no abusando de los recursos. No estamos en contra del progreso, pues como ya se ha expuesto, son muchos y variados los usos y aplicaciones de las radiaciones que han hecho nuestra vida más confortable, e incluso en biomedicina han contribuido a incrementar el promedio de vida del ser humano. Sí estamos en contra de aquellas medidas, que, sobreponiendo intereses económicos no toman en cuenta el impacto que sobre el ecosistema se produce. Al fin de cuentas, el mismo ser humano pagará las consecuencias de un desarrollo carente de planeación alguna.

Si bien es cierto, los sistemas biológicos tienen una capacidad de adaptación sorprendente, el hecho de que cada vez más se incrementa la intensidad de la radiación en el ecosistema, nos lleva a la pregunta: ¿Hasta cuándo soportarán las células esta carga energética extra? Como ya se mencionó, el exceso de energía que reciben ahora los sistemas biológicos aumenta la entropía del sistema, reduciendo la energía libre de la cual se valen las células para reparar los daños ocasionados por las radiaciones y otros factores físicos y químicos.

Con referencia a la exposición a CEM, aunque si bien no podemos prescindir del uso de la electricidad, si deberán considerarse medidas para evitar la sobre-exposición a los mismos.

Sin caer en catastrofismos, se puede vislumbrar que con tantos agresores físicos de tipo radiación en el ambiente, progresivamente será necesario que las fuerzas evolutivas actúen para dotar a los seres vivos de cualidades adaptativas mejores, en este caso surge otra pregunta: ¿Habrá el tiempo suficiente para ello?



LITERATURA CITADA

- Alexieva, V., I. Sergiev, S. Mapelli, E. Karanov. 2001. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. *Plant, Cell & Environment*. 24(12) 1337-1344. doi:10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x
- Androjna, C., B. Fort, M. Zborowski, R.J. Midura. 2014. Pulsed electromagnetic field treatment enhances healing callus biomechanical properties in an animal model of osteoporotic fracture. *Bioelectromagnetics*. 35(6) 396-405. doi:10.1002/bem.21855
- Bancroft, B.A., N.J. Baker, A.R. Blaustein. 2007. Effects of UVB radiation on marine and freshwater organisms: A synthesis through meta-analysis. *Ecology Letters*. 10(4) 332-345. doi:10.1111/j.1461-0248.2007.01022.x
- Belova, N.A., D. Acosta-Avalos. 2015. The effect of extremely low frequency alternating magnetic field on the behavior of animals in the presence of the geomagnetic field. *Journal of Biophysics*. 2015, 1-8. doi:10.1155/2015/423838
- Besson, B., L. Pourcelot, E. Lucot, P. Badot. 2009. Variations in the transfer of radiocesium (^{137}Cs) and radiostrontium (^{90}Sr) from milk to cheese. *Journal of Dairy Science*. 92(11) 5363-5370. doi:10.3168/jds.2009-2357
- Bonin A., A. Tsilanizara. 2017. A method to improve dose assessment by reconstruction of the complete isotopes inventory. *Radiat Prot Dosimetry*. 175(1): 46-57. doi:10.1093/rpd/ncw266
- Bor-Sen, C., W. Shang-Wen, L. Cheng-Wei. 2015. On the calculation of system entropy in nonlinear stochastic biological networks. *Entropy*. 17(10) 6801-6833. doi:10.3390/e17106801
- Boucher, O. 2010. Stratospheric ozone, ultraviolet radiation and climate change. *Weather*. 65:105-110. doi:10.1002/wea.451
- Brehwens, K., E. Staaf, S. Haghdoost, A.J. González, A. Wojcik. 2010. Cytogenetic damage in cells exposed to ionizing radiation under conditions of a changing dose rate. *Radiation Research*, 173(3), 283-289. doi:10.1667/RR2012.1
- Chang, C., M. Villalun, S. Geib, C. Goodman, J. Ringbauer, D. Stanley. 2015. Pupal X-ray irradiation influences protein expression in adults of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis*. *Journal of Insect Physiology*. 76, 7-16. doi:10.1016/j.jinsphys.2015.03.002
- Cullings, H.M., E.J. Grant, S.D. Egbert, T. Watanabe, T. Oda, F. Nakamura, T. Yamashita, H. Fuchi, S. Funamoto, K. Marumo, R. Sakata, Y. Kodama, K. Ozasa, K. Kodama. 2017. DS02R1: Improvements to atomic bomb survivors' input data and implementation of dosimetry system 2002 (DS02) and resulting changes in estimated doses. *Health Phys*. 112(1):56-97. doi:10.1097/HP.0000000000000598
- Gifford, D. 1989. Dose limits for ionizing-radiation. *Contemporary Physics*. 30(5), 367-376. doi: 10.1080/00107518908213775
- Heredia-Rojas, J. A., A.O. Rodríguez-De la Fuente, M. Velazco-Campos, C.H. Leal-Garza, L.E. Rodríguez-Flores, B. De la Fuente-Cortez. 2001. Cytological effects of 60 Hz magnetic fields on human lymphocytes in vitro: Sister-chromatid exchanges, cell kinetics and mitotic rate. *Bioelectromagnetics*. 22(3)145-149. doi:10.1002/bem.32
- Heredia-Rojas, J.A., D.E. Caballero-Hernández, A.O. Rodríguez-De la Fuente, G. Ramos-Alfano, L.E. Rodríguez-Flores. 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(1)63-68. doi:10.1002/bem.10184
- Hollósy, F. 2002. Effects of ultraviolet radiation on plant cells. *Micron*. 33(2)179-197. doi:10.1016/S0968-4328(01)00011-7

- Hu, J., T. Zhang, D. Xu, J. Qu, L. Qin, J. Zhou, H. Lu. 2015. Combined magnetic fields accelerate bone-tendon junction injury healing through osteogenesis. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 25(3) 398-405. doi:10.1111/sms.12251
- Jaworowski, Z. 2010. Observations on the Chernobyl disaster and LNT. *Dose-Response*. 8(2)148-171. doi:10.2203/dose-response.09-029.Jaworowski
- Jeggo, P., M. Lobrich. 2006. Radiation-induced DNA damage responses. *Radiation Protection Dosimetry*. 122(1-4) 124-127. doi:10.1093/rpd/nc1495
- Joshi, R., R. Gangabagirathi, S. Venu, S. Adhikari, T. Mukherjee. 2012. Antioxidant activity and free radical scavenging reactions of gentisic acid: In-vitro and pulse radiolysis studies. *Free Radical Research*. 46(1) 11-20. doi:10.3109/10715762.2011.633518
- Ko, G., M.W. First, H.A. Burge. 2001. The characterization of upper-room ultraviolet germicidal irradiation in inactivating airborne microorganisms. *Environmental Health Perspectives*. 110(1) 95-101. doi:10.1289/ehp.0211095
- Libby, W. F. 1955. Radioactive Fall-out. *Bulletin of The Atomic Scientists*. 11(7), 256-260.
- Maalouf M., M. Durante, N. Foray. 2011. Biological effects of space radiation on human cells: history, advances and outcomes. *J Radiat Res*. 52 (2): 126-146. doi:10.1269/jrr.10128
- Møller, A.P., T.A. Mousseau. 2013. The effects of natural variation in background radioactivity on humans, animals and other organisms. *Biological Reviews*. 88(1) 226-254. doi:10.1111/j.1469-185X.2012.00249.x
- Nagasaki S. 2016. Thoughts on relief for atomic bomb survivors since Obama's visit to Hiroshima. *Lancet*. 388(10054):1878-1879. doi: 10.1016/S0140-6736(16)31728-7.
- Newman, P.A., L.D. Oman, A.R. Douglass, E.L. Fleming, S.M. Frith, M.M. Hurwitz, S.R. Kawa, C.H. Jackman, N.A. Krotkov, E.R. Nash, J.E. Nielsen, S. Pawson, R.S. Stolarski, G.J.M. Velders. 2009. What would have happened to the ozone layer if chlorofluorocarbons (CFCs) had not been regulated? *Atmospheric Chemistry and Physics*. 9(6) 2113-2128. doi.org/10.5194/acp-9-2113-2009
- Osterwalder, U., M. Sohn, B. Herzog. 2014. Global state of sunscreens. *Photodermatology. Photoimmunology & Photomedicine*. 30: 62-80. doi: 10.1111/phpp.12112.
- Parikh J.R., R.A. Geise, E.I. Bluth, C.E. Bender, G. Sze, A.K. Jones. 2017. Potential radiation-related effects on radiologists. *AJR Am J Roentgenol*. 208(3):595-602. doi: 10.2214/AJR.16.17212.
- Pool R. 1990. Is there an EMF-cancer connection? *Science*. 249(4973):1096-1098.
- Qin, B., U.R. Pothakamury, G.V. Barbosa-Cánovas, B.G. Swanson. 1996. Nonthermal pasteurization of liquid foods using high-intensity pulsed electric fields. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 36(6) 603-627.
- Robson, T. M., S.M. Hartikainen, P.J. Aphalo. 2015. How does solar ultraviolet-B radiation improve drought tolerance of silver birch (*Betula pendula* Roth.) seedlings? *Plant Cell Environ*. 38: 953-967. doi:10.1111/pce.12405
- Rodríguez-De la Fuente, A.O., J.A. Heredia-Rojas, B.D. Mata-Cárdenas, J. Vargas-Villarreal, L.E. Rodríguez-Flores, I. Balderas-Candanosa, J.M. Alcocer-González. 2008. Entamoeba invadens: Influence of 60 hz magnetic fields on growth and differentiation. *Experimental Parasitology*. 119(2) 202-206. doi:10.1016/j.exppara.2008.01.006
- Rodríguez de la Fuente, A.O., J.M. Alcocer-González, J.A. Heredia-Rojas, I. Balderas-Candanosa, L.E. Rodríguez-Flores, C. Rodríguez-Padilla, R.S. Tamez-Guerra. 2009. Effect of 60 Hz electromagnetic fields on the activity of hsp70 promoter: An in vitro study. *Cell Biology*

International. 33(3) 419-423. doi:10.1016/j.cellbi.2008.09.014

Rodríguez-De la Fuente A.O., J.M. Alcocer-González, J.A. Heredia-Rojas, C. Rodríguez-Padilla, L.E. Rodríguez-Flores, M.A. Santoyo-Stephano, E. Castañeda-Garza, R.S. Tamez-Guerra. 2012. Effect of 60 Hz electromagnetic fields on the activity of hsp70 promoter: an in vivo study. *Cell Biol Int Rep.* 26;19(1):e00014. doi: 10.1042/CBR20110010.

Rutkowski, R., A. Straburzyńska-Lupa, P. Korman, W. Romanowski, M. Gizińska. 2011. Thermal effectiveness of different IR radiators employed in rheumatoid hand therapy as assessed by thermovisual examination. *Photochemistry and Photobiology.* 87: 1442-1446. doi: 10.1111/j.1751-1097.2011.00975.x

Sarghein, S., J. Carapetian, J. Khara. 2011. The effects of UV radiation on some structural and ultrastructural parameters in pepper (*Capsicum longum* A.DC.). *Turkish Journal of Biology.* 35(1) 69-77. doi:10.3906/biy-0903-11

Shruthi, B., P. Vinodhkumar, B. Kashyap, P. Reddy. 2013. Use of microwave in diagnostic pathology. *Journal of Cancer Research and Therapeutics.* 9(3), 351-355. doi:10.4103/0973-1482.119301

Swiderek, P. 2006. Fundamental processes in radiation damage of DNA. *Angew. Chem. Int. Ed.* 45: 4056-4059. doi: 10.1002/anie.200600614

Valadez-Lira, J.A., N. Medina-Chávez, A. Orozco-Flores, J.A. Heredia-Rojas, A.O. Rodríguez-de la Fuente, R. Gómez-Flores, J.M. Alcocer-González, P. Tamez-Guerra. 2017. Alterations of immune parameters on *Trichoplusia ni* (Lepidoptera: Noctuidae) larvae exposed to extremely low-frequency electromagnetic fields. *Environmental Entomology.* 46(2) 376-382. doi:10.1093/ee/nvx037

Wertheimer N., E. Leeper. 1979. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *American Journal of Epidemiology.* 109:273-284. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/453167>.

Wiltschko, W., R. Wiltschko. 2005. Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology.* 191(8) 675-693. doi:10.1007/s00359-005-0627-7

Yalemar, J.A., A.H. Hara, S.H. Saul, E.B. Jang, J.H. Moy. 2001. Effects of gamma irradiation on the life stages of yellow flower thrips, *Frankliniella schultzei* (Trybom) (Thysanoptera: Thripidae). *Annals of Applied Biology.* 138: 263-268. doi: 10.1111/j.1744-7348.2001.tb00111.x

Zhang, Y., J. Lai, G. Ruan, C. Chen, D. Wang. 2016. Meta-analysis of extremely low frequency electromagnetic fields and cancer risk: A pooled analysis of epidemiologic studies. *Environment International.* 88: 36-43. doi:10.1016/j.envint.2015.12.012