

TESIS DEFENDIDA POR
Daniela de Jesús Quintana Flores
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Paúl Medina Castro
Director del comité

M.I. Irma Uriarte Ramírez
Miembro del comité

Dr. Noemí Lizárraga Osuna
Miembro del comité

Dr. Camilo Caraveo Mena
Miembro del comité

Dr. Eder Germán Lizárraga Medina
Miembro del comité

Dr. Paúl Medina Castro
Coordinador del programa

Dr. David Abdel Mejía Medina
Director de la FCITEC

Junio del 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA



**REVISIÓN DE LOS EFECTOS EN LA SALUD HUMANA POR LA RADIACIÓN
ELECTROMAGNÉTICA DE DISPOSITIVOS CELULARES**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
BIOINGENIERO

Presenta:

DANIELA DE JESÚS QUINTANA FLORES

Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México. Junio del 2023.

RESUMEN de la tesis de DANIELA DE JESÚS QUINTANA FLORES, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de BIOINGENIERÍA. Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México. Junio del 2023.

REVISIÓN DE LOS EFECTOS EN LA SALUD HUMANA POR LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE DISPOSITIVOS CELULARES

Resumen aprobado por:

Dr. Paúl Medina Castro
Director del comité

El trabajo de tesis surge como un intento de atender la preocupación sobre si la radiofrecuencia que se utiliza para efectuar las comunicaciones produce efectos perjudiciales en los usuarios de los teléfonos celulares. Para esto en este documento se estudian de manera general los conceptos básicos de las redes celulares, así como su evolución. También se estudian también los estándares que regulan los niveles de emisión de los teléfonos celulares, los cuales están enfocados en reducir el calentamiento de los tejidos, de forma que la temperatura no se incremente más de 2 °C de lo que se considera la temperatura normal. Posteriormente, se resumen los resultados principales de las investigaciones que buscan encontrar una posible asociación entre el uso de los teléfonos celulares y el cáncer. El resultado principal de la investigación es que la probabilidad de que las emisiones del teléfono celular produzcan tumores es baja. Finalmente, se especula sobre las tecnologías emergentes de la 5G y las investigaciones que serían necesarias para garantizar que la radiofrecuencia utilizada no sea perjudicial en la salud.

PALABRAS CLAVE: Telefonía celular, Salud, Regulación de la radiofrecuencia, Cáncer.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, doy gracias a Dios por permitirme cumplir con esta meta en mi vida.

Agradezco a mi Madre por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida por siempre ser el soporte y la guía para seguir estudiando y gracias a ello concluir mi carrera universitaria.

A mi Padre que me apoyó con los gastos escolares.

A mi abuela por siempre apoyarme en cada decisión y siempre a ver estado a mi lado en cada logro durante mi vida. ¡Gracias!

Al resto de mi familia por apoyarme siempre.

A mis compañeros de estudios que estuvieron siempre apoyándome en cada paso durante nuestra etapa estudiantil, sin ellos la carrera no hubiera sido lo que fue con grandes aventuras.

Gracias a mis maestros que con sus enseñanzas fortalecieron mis conocimientos profesionales, en especial a mi asesor de tesis Dr. Paúl Medina Castro por haberme brindado la oportunidad de recurrir a sus conocimientos, así como también haberme tenido tanta paciencia en este proceso de desarrollo de la tesis.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABLAS	vii
INTRODUCCIÓN	1
I.1 Antecedentes y planteamiento.....	1
I.2 Objetivo.....	3
I.3 Organización de la tesis	3
RADIOFRECUENCIA Y REDES CELULARES	5
II.1 Ondas electromagnéticas.....	5
II.2 Espectro electromagnético y de radiofrecuencia.....	7
II.3 Las redes celulares	9
II.4 Las generaciones de la telefonía celular.....	11
II.5 Comentarios adicionales	14
REGULACIÓN DE LAS EMISIONES DE RADIOFRECUENCIA	15
III.1 SAR, Tasa de Absorción Específica.....	15
III.2 Recomendaciones de la ICNIRP	17
III.3 Estándar IEEE C95.1	23
III.4 Límites aplicados a los teléfonos celulares	26
III.5 Comentarios adicionales.....	28
EFFECTOS EN LA SALUD	29
IV.1 Clasificación de agentes cancerígenos del IARC	29
IV.2 Estudio Interphone.....	31
IV.3 Monografía del IARC sobre radiación electromagnética	36

IV.4	Comentarios finales	39
CONCLUSIONES	41
REFERENCIAS	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Espectro electromagnético.	8
Figura 2. Repartición de canales de radiofrecuencia en una red celular, se utilizan tres grupos de canales de radiofrecuencia indicados con el número 1, 2 y 3, respectivamente. (Gu & Peng, 2010)	10

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de una onda electromagnética.....	6
Tabla 2. Bandas de radiofrecuencia de la ITU-R.....	9
Tabla 3. Principales características de las diferentes generaciones de redes celulares.....	13
Tabla 4. Restricciones básicas por efectos térmicos.....	22
Tabla 5. Posibles efectos biológicos por rango de frecuencias.....	23
Tabla 6. Comparación de terminología entre el estándar IEEE C95.1 y la Guía ICNIRP. ..	24
Tabla 7. DLRs para el rango 100 kHz – 300 GHz.....	25
Tabla 8. Valores del SAR reportados en los manuales de algunos teléfonos celulares.....	27
Tabla 9. Clasificación de cancerígenos del IARC.	30
Tabla 10. Desglose del número de casos y controles por padecimiento del estudio Interphone.	32

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

I.1 ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO

Las fuerzas eléctricas y magnéticas son conocidas por lo menos desde el tiempo de los Antiguos griegos. A lo largo de la historia muchas personas trabajaron para descifrar el misterio de estos fenómenos. Después de muchos esfuerzos en el campo de la física, se ha demostrado que ambos son consecuencia de una propiedad básica de la materia: la carga eléctrica. Un campo eléctrico es asociado a las cargas por el simple hecho de existir, y un campo magnético se genera cuando hay cargas en movimiento. El electromagnetismo es el estudio de estos dos fenómenos intrínsecamente ligados (Resnick, Halliday, & Krane, 2002).

La existencia de las ondas electromagnéticas fue predicha matemáticamente por Maxwell en 1873, y fue hasta quince años después que Hertz realizó su demostración práctica. Posteriormente la idea de utilizar las ondas electromagnéticas para el envío de información fue concretada por Marconi cuando realizó la primera transmisión telegráfica inalámbrica (Rappaport, 2002). De esta manera la novedad tecnológica de inicios siglo XX fueron las comunicaciones de radiofrecuencia, esta tecnología fue extendiéndose y madurando primero lentamente y después de manera muy acelerada.

Gracias a la miniaturización de la electrónica, los avances en los algoritmos de procesamiento de señales y de codificación de la información, pero sobre todo a la gran aceptación y demanda de los usuarios, los enlaces de radiofrecuencia han pasado del transporte de información telegráfica en código Morse hasta el transporte de información multimedia de la Internet. Sin lugar a dudas, entre las tecnologías que despuntaron en el cierre del siglo XX destacan las comunicaciones celulares y las redes inalámbricas Wi-Fi, que evidentemente se basan en la transmisión de ondas de radiofrecuencia. En los últimos años hemos sido testigos de la evolución de los dispositivos celulares, desde los que tenían teclado de botones y una pequeña pantalla LCD usados exclusivamente para llamadas y envío de mensajes cortos,

hasta los actuales *smartphones* que compiten con las laptops en capacidad de procesamiento, prestaciones y uso (Islam & Want, 2014).

Junto con la evolución de las tecnologías de comunicación inalámbrica también se ha mantenido en los usuarios la preocupación sobre los riesgos en la salud que podría implicar la creciente exposición a las ondas electromagnéticas, sobre todo en las frecuencias correspondientes a las utilizadas para la comunicación celular y las redes Wi-Fi, que han sido las que se han extendido más y que utilizamos prácticamente a cualquier hora del día y casi en cualquier lugar.

Se sabe que varios de los procesos fisiológicos del cuerpo humano involucran el movimiento de partículas ionizadas, de ellos podemos mencionar por ejemplo los mecanismos que regulan la actividad cardíaca y el utilizado por las neuronas en el sistema nervioso para la comunicación de estímulos sensoriales (Silverthorn , 2008). Se teme que la exposición esporádica a campos electromagnéticos muy intensos o las exposiciones de largo plazo a campos de baja intensidad puedan influir en los procesos fisiológicos y causar algún tipo de malfuncionamiento temporal o crónico. Inclusive hay quienes han asociado la radiofrecuencia con algunos tipos de cáncer.

También se sabe que las ondas electromagnéticas de radiofrecuencia pueden producir el calentamiento de algunos tejidos y órganos internos, de manera similar a como un horno de microondas calienta los alimentos, y se sospecha que este calentamiento puede causar daños temporales o permanente en órganos sensibles.

Desde hace algunos años varias organizaciones se han dado a la tarea de promover y patrocinar investigaciones para evaluar los riesgos que se corren por el uso cotidiano de los dispositivos celulares. Por ejemplo, en Estados Unidos, un grupo dentro del Instituto Nacional del Cáncer (NCI, por sus siglas en inglés) realiza y patrocina investigaciones orientadas a determinar si la exposición excesiva a ondas de radiofrecuencia emitidas por los teléfonos celulares son un potencial cancerígeno, o si éstas facilitan el desarrollo del cáncer en conjunto con algún otro tipo de exposición de riesgo (National Cancer Institute, 2019). Por su parte la Organización Mundial de la Salud (OMS) creó el *International EMF Project*, que tiene como

propósito evaluar los efectos, en la salud y en el ambiente, de la exposición a la radiación electromagnética comprendida en el rango de frecuencias de 0 a 300 GHz (Organización Mundial de la Salud, 2018). También en el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés), que es parte de la OMS, se estudian los posibles efectos cancerígenos de varios agentes, incluida la radiación electromagnética de los teléfonos celulares (IARC, 2012).

Este trabajo de investigación surge como una necesidad de responder a estos cuestionamientos que preocupan a los usuarios de los dispositivos de comunicación inalámbrica por radiofrecuencia en nuestra comunidad local. Las respuestas fueron buscadas en publicaciones con bases científicas y avaladas por los organismos internacionales y revisiones por pares.

I.2 OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo es la escritura de un documento, en el que se discuta acerca del impacto en la salud humana por el uso de los equipos de comunicación por radiofrecuencia, específicamente de los teléfonos celulares. La investigación debe estar basada en el estado del arte de las publicaciones de organismos de salud pública a nivel nacional e internacional, así como de organizaciones de difusión científica y tecnológica.

I.3 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

A continuación, se muestra la organización del documento:

- En el capítulo II se presenta una breve introducción a lo que es la radiofrecuencia y los principales parámetros que la caracterizan. Aquí mismo también se revisan los principios de las comunicaciones celulares.
- En el capítulo III se definen los conceptos que se utilizan para medir los niveles de exposición a campos electromagnéticos y se resumen las regulaciones internacionales de las emisiones de radiofrecuencia con énfasis en las regulaciones para los teléfonos celulares.

- En el capítulo IV se discuten los principales resultados de las investigaciones referentes a los efectos en la salud por la exposición a la radiación del teléfono celular, específicamente se revisan si la exposición puede producir cáncer.
- Finalmente, en el capítulo V se concluye el documento, se resumen las principales contribuciones del trabajo.

CAPÍTULO II

RADIOFRECUENCIA Y REDES CELULARES

En este capítulo se da un contexto general de los temas relacionados con la radiofrecuencia y las comunicaciones celulares. El propósito es sentar las bases teóricas que ayuden a comprender los conceptos de dosimetría que se utilizan en las especificaciones técnicas de los equipos de radiocomunicación y por las organizaciones de salud para cuantificar los niveles de exposición. Es importante mencionar que tanto la teoría electromagnética como los sistemas de comunicación celular son muy complejos, y lo que aquí se presenta es información muy simplificada, solo la mínima indispensable que permita abordar las cuestiones técnicas que sirvan a los propósitos de esta tesis.

II.1 ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Una onda es una excitación que se propaga a través del espacio o algún medio como una función del tiempo (Wolfgang & Westfall, 2014). Un tipo de ondas que nos resultan muy familiares son las ondas de sonido. Cuando una persona habla, las cuerdas vocales vibran perturbando el aire en la garganta y en la boca, luego esta perturbación se propaga a través del aire exterior hasta alcanzar el oído de una persona que escucha. No significa que las partículas salgan de la garganta de quien habla y viajen hasta el oído de quién escucha, lo que viaja es la perturbación: una partícula que vibra transmite su vibración a una partícula vecina, hasta que el efecto alcanza las partículas dentro del oído del oyente que a su vez estimulan los receptores auditivos. Este efecto es similar a la primera ficha de dominó que derriba a la segunda, y ésta a la tercera, y el efecto se propaga derribando toda la hilera hasta llegar a la última ficha. El sonido puede propagarse siempre que haya partículas que puedan vibrar, ya sea en gases, líquidos o sólidos; sin embargo, el sonido no puede propagarse a través del vacío ya que no hay partículas que puedan propagar el efecto. De hecho, entre menos denso sea el medio más lento viaja el sonido.

Las ondas electromagnéticas también abundan en el ambiente, incluso más que las de sonido, sin embargo, no nos parecen tan familiares porque la gran parte de ellas no son percibidas

por nuestros sentidos. La excepción es una pequeña fracción de ellas, a la que llamamos “luz visible”. En la propagación de las ondas electromagnéticas no es necesario que haya partículas oscilando ni que éstas transmitan el movimiento unas a otras, lo que oscila en las ondas electromagnéticas son las magnitudes de dos campos: el campo eléctrico y el campo magnético, de ahí su nombre. Estos dos campos son interdependientes y se generan uno al otro, siempre que uno de ellos está presente variando en el tiempo produce que aparezca el otro siguiendo una variación similar al campo que lo origina, el segundo campo a su vez volverá a generar al primero en un punto vecino infinitesimal y así el efecto de cogeneración se irá propagando en el espacio. De manera contraria al sonido, las ondas electromagnéticas se propagan a mayor velocidad en ambientes menos densos, alcanzando su velocidad máxima en el vacío, esta cantidad es ampliamente conocida, se le llama “velocidad de la luz”, y se denota con la letra $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$.

En la Tabla 1 se listan los parámetros con los que se define a una onda electromagnética. Algunos de ellos dan información redundante, ya que hay dependencia entre ellos. Por ejemplo, el periodo (T) y la frecuencia (f) son dos maneras alternativas de dar la misma información, el periodo define la duración en segundos de una oscilación completa del campo y la frecuencia el número de oscilaciones en un segundo, esta unidad se conoce como hertz. La frecuencia y el periodo son magnitudes inversas como se muestra en la ecuación (1).

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Tabla 1. Parámetros de una onda electromagnética

Parámetro	Símbolo	Unidades en el SI
Periodo	T	S
Frecuencia	f	Hz
Longitud de onda	λ	m
Amplitud (del campo eléctrico)	A	V/m
Potencia	P	W
Intensidad	I	W/m ²

La longitud de onda se refiere a la distancia más corta entre dos puntos del espacio en los que el campo oscila de manera sincronizada. La longitud de onda también guarda una relación

inversa con la frecuencia, y se pueden utilizar de manera alternativa; sin embargo, hay que aclarar que la longitud de onda también depende de la velocidad de la onda, por lo que normalmente la equivalencia se refiere a la onda viajando en el vacío, a la velocidad de la luz, como se muestra en la ecuación (2).

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

El resto de los parámetros de la onda que se especifican en la Tabla 1 son la amplitud, que se refiere a la magnitud de la oscilación del campo eléctrico (generalmente se especifica solo el campo eléctrico porque es más fácil de medir y porque el campo magnético es proporcional al eléctrico); la potencia, que cuantifica la rapidez con que la energía transportada por la onda puede realizar un trabajo moviendo partículas cargadas; y la intensidad, que se refiere a la concentración de esta potencia en determinada área. Obviamente en la onda existe una proporcionalidad directa entre la amplitud, la potencia y la intensidad, y las tres tienden a disminuir conforme el punto de observación de la onda se aleja de la fuente que la origina.

II.2 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y DE RADIOFRECUENCIA

Se conoce como espectro electromagnético a un esquema que muestra una escala de frecuencia (y longitudes de onda) dividida en intervalos, a cada intervalo de la escala se le da un nombre que puede hacer referencia al uso que se le da a esa porción de ondas electromagnéticas, o a la manera en que ese rango en específico puede ser generado, o a alguna otra característica que distinga un intervalo del resto. En la Figura 1 se muestra un esquema de espectro electromagnético tomado de (Young & Freedman, 2013). Es importante hacer dos observaciones a la figura, que son comunes en todos los esquemas: la primera es que el intervalo de frecuencias cubierto por las ondas electromagnéticas es enorme por lo que normalmente se presenta en escala logarítmica; y la segunda es que los rangos marcados se traslapan, ni siquiera es claro cuáles son las frecuencias de frontera entre cada uno. De hecho, si se compararan los esquemas de varias fuentes bibliográficas es probable que no coincidan con exactitud en la asignación de los rangos a cada nombre identificador.

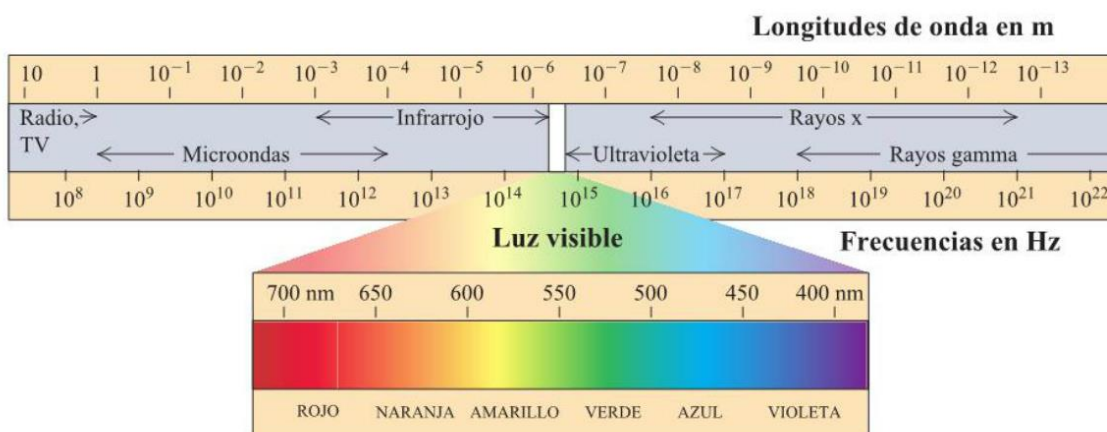


Figura 1. Espectro electromagnético. [Tomada de: (Young & Freedman, 2013)]

A la izquierda del espectro electromagnético de la Figura 1 se observan los intervalos marcados como “Radio, TV” y otro marcado como “Microondas”. Al primero se le asignó ese nombre porque algunas frecuencias de este intervalo se utilizan para la radiodifusión y la transmisión de televisión. El segundo intervalo, “Microondas”, recibe su nombre porque las longitudes de onda son inferiores a un metro, aunque su nombre sugiera longitudes de onda en el orden de los micrómetros, el nombre en este caso es porque históricamente fue un reto tecnológico lograr la construcción de los dispositivos que de manera artificial pudieran generar ondas de esta frecuencia. Posteriormente a las microondas está la luz infrarroja, seguido de la luz visible y la luz ultravioleta.

Como ya mencionamos no existe un consenso en los nombres que se le asignan a los intervalos del espectro radioeléctrico, ni en los puntos de inicio y fin de cada uno. Es necesario adoptar alguna de las convenciones para nombrarlos. En este trabajo utilizaremos los rangos definidos por la Sección de Radiocomunicación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-R) que considera que la radiofrecuencia se extiende desde los 3 kHz a los 300 GHz. En la Tabla 2 se muestran las bandas de radiofrecuencias y sus principales usos en telecomunicaciones (ITU-R, 2015).

Tabla 2. Bandas de radiofrecuencia de la ITU-R

Banda	Frecuencia	Utilización
Ondas miriamétricas (Very Low Frequency - VLF)	3-30 kHz	A escala mundial radionavegación de largo alcance y comunicaciones estratégicas
Ondas kilométricas (Low Frequency - LF)	30-300 kHz	Radionavegación de largo alcance y comunicaciones estratégicas
Ondas hectométricas (Medium Frequency - MF)	0.3-3 MHz	Medio alcance, servicio de radiodifusión y servicio móvil marítimo
Ondas decamétricas (High Frequency - HF)	3-30 MHz	Largo alcance y corto alcance, radiodifusión mundial, servicio móvil.
Ondas métricas (Very High Frequency - VHF)	30-300 MHz	Corto alcance y medio alcance, servicio móvil, redes de área local, radiodifusión de audio y vídeo, comunicaciones personales.
Ondas decimétricas (Ultra High Frequency - UHF)	0.3-3 GHz	Corto alcance y medio alcance, servicio móvil, redes de área local, radiodifusión de audio y vídeo, comunicaciones personales, comunicaciones por satélite.
Ondas centimétricas (Super High Frequency -SHF)	3-30 GHz	Medio a corto alcance, difusión de audio y vídeo, redes de área local, comunicaciones móviles/personales, comunicaciones por satélite
Ondas milimétricas (Extra High Frequency -EHF)	30-300 GHz	Corto alcance, microcelular, redes de área local, comunicaciones personales, comunicaciones por satélite.

Algo que comparten en común todas las señales de radiofrecuencia es que se todas ellas se pueden producir artificialmente haciendo oscilar corrientes eléctricas en materiales conductores. En el caso de los sistemas de radiocomunicación los dispositivos conductores utilizados para generar de manera eficiente las radiofrecuencias se conocen como antenas transmisoras, y su contraparte, los dispositivos encargados de detectarlas, se conocen como antenas receptoras. En la mayoría de los equipos de radiocomunicación actuales, la misma antena se utiliza simultáneamente para transmitir y recibir, éstas se conocen como antenas transeptoras.

II.3 LAS REDES CELULARES

Un sistema de telefonía celular provee a sus usuarios acceso a la red telefónica mediante una conexión inalámbrica, siempre que éstos se encuentren dentro de su área de cobertura, y más recientemente también les brinda acceso a la Internet. El adjetivo “celular” se debe a que el

área de cobertura total es dividida en zonas más pequeñas a las que llaman células, cada una con su propia estación base (BS – *Base Station*). Una BS consiste de varios transmisores y receptores que utiliza para mantener comunicación bidireccional simultánea con los teléfonos móviles, generalmente las antenas de las BS están montadas en lo alto de una torre para que el enlace con los teléfonos se logre a mayor cobertura con menor gasto de energía. La división en células permite el reuso espacial del espectro, lo que en teoría permite dar servicio a un ilimitado número de usuarios a costa de una mayor complejidad en la red. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de cómo repartir tres grupos de canales de radiofrecuencia sin que las transmisiones dentro de la zona de cobertura de una BS interfieran con las vecinas, se observa en la figura que el grupo de canales 1 nunca se encuentra asignado en dos células contiguas, lo mismo sucede con los canales 2 y 3.

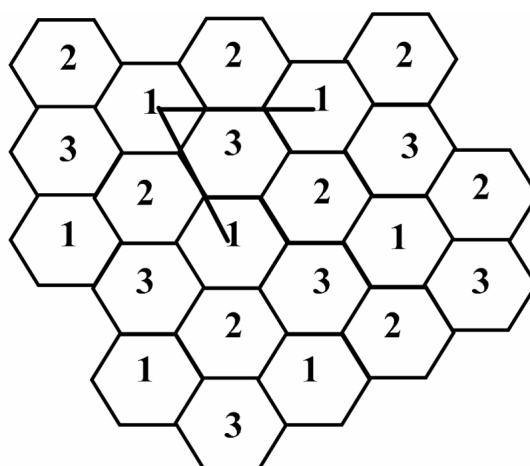


Figura 2. Repartición de canales de radiofrecuencia en una red celular, se utilizan tres grupos de canales de radiofrecuencia indicados con el número 1, 2 y 3, respectivamente. (Gu & Peng, 2010)

En la realidad, la zona de cobertura de una BS no es hexagonal, en ausencia de obstáculos y con antenas perfectamente omnidireccionales lo mejor que se podría conseguir es una cobertura circular. Por el hecho de que siempre hay obstáculos e irregularidades del terreno, la zona de cobertura jamás tendrá una forma simétrica, pero eso en realidad no importa, ya que siempre se puede tener más grupos de canales y poner los canales de la misma frecuencia lo más alejados unos de otros, de tal manera que permita más traslape entre las células y no

queden zonas sin cobertura. Se puede lograr que una célula tenga un área de cobertura muy cercana a la forma y extensión deseada, esto se hace mediante el uso de antenas sectoriales y mediante la manipulación de la altura y la potencia de transmisión de las antenas.

El reuso del espectro en las redes celulares, además de que en teoría permite dar servicio a un ilimitado número de usuarios, también permite que los mismos equipos trabajen con el mismo rango de frecuencias, facilitando así la fabricación en serie y la interoperabilidad de los equipos.

II.4 LAS GENERACIONES DE LA TELEFONÍA CELULAR

Las comunicaciones celulares tienen como predecesores a los radios de dos vías tipo “*Walkie-Talkie*”, en estos sistemas dos o más radios portátiles se comunican a través de un enlace de radio dedicado enviando mensajes de voz analógica. Estos radios utilizan un botón que se pulsa cada vez que un usuario quiere enviar un mensaje de voz y todos los demás usuarios lo escuchan.

Los sistemas celulares que se conocen como “de primera generación” (1G) surgieron a principios de los 80’s. La tecnología 1G consistía en comunicaciones de voz en formato analógico con modulaciones en frecuencia (Ewa & Andrzej, 2019). Utilizaba unos pesados teléfonos que por su forma y tamaño eran conocidos como “ladrillos”. La principal diferencia con respecto a los sistemas anteriores es que la 1G utilizaba múltiples estaciones base capaces de realizar la transferencia de llamada (*handoff*) conforme el usuario se desplazaba de una célula a otra, esto sin que el usuario lo notara.

La segunda generación (2G) fue introducida a principio de los 90’s, la principal característica de esta tecnología es que fue totalmente digital, lo cual le permitió conectar la red celular con la red telefónica cableada. En esta generación se encuentra el conocido sistema GSM (Sistema Global de comunicaciones Móviles, por sus siglas en francés), que es el sistema precursor de la unificación de la telefonía celular en un solo sistema global. También el formato digital permitió la introducción de los mensajes de texto SMS (Servicio de Mensaje

Corto, por sus siglas en inglés), y después hubo un intento por introducir conexiones de acceso a la Internet. Esto último se les dificultó a los sistemas 2G, debido a que eran redes de conmutación de circuitos, en las que, de manera similar a los antiguos módems telefónicos, se debía establecer una conexión dedicada durante toda la transferencia de datos, lo cual es muy ineficiente para la transmisión de datos, y también demasiado caro. La conocida como 2.5G introdujo un “parche” en el sistema celular 2G para convertirlo en una red de conmutación de paquetes, esto permitió transmisiones asíncronas, una mayor velocidad de transmisión y abarató los costos, ya que en este sistema se cobra al usuario por la cantidad de datos transmitidos y no por el tiempo de conexión. Los sistemas representativos de la 2.5G se conocen como GPRS (*General Packet Radio Service*) que luego evolucionaron a EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*).

La tercera generación (3G) fue introducida a inicios de la primera década de los 2000, su característica principal es el incremento en la tasa de datos, que pasó de los kbps (kilo bits por segundo) a los Mbps (Mega bits por segundo). Con esta mayor velocidad de transmisión se logró una comunicación efectiva a través de la Internet, al mismo tiempo que el avance de la tecnología permitió el surgimiento de los móviles inteligentes (*Smartphones*). Al final de esta misma década surgieron las tecnologías de cuarta generación (4G) basadas en un novedoso estándar de comunicación llamado *Long Term Evolution* (LTE) que considera el uso de más de una antena en el mismo equipo y el uso del esquema de modulación OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) que ha demostrado ser muy eficiente en transmisiones inalámbricas. Con LTE se aumentó el ancho de banda de los canales a 20 MHz (3G usaba 5 MHz), con el que se pudo alcanzar tasas de transmisión de hasta 1 Gbps, y se abrió paso a las aplicaciones multimedia y las videollamadas. En 4G además se desecha por completo la conmutación de circuitos de la telefonía, siendo una red IP en su totalidad, y por lo tanto compatible de manera nativa con todos los protocolos y aplicaciones de la Internet.

Actualmente, está en desarrollo la quinta generación (5G) de las comunicaciones celulares. A la fecha de escritura de este documento todavía no se ha concretado un estándar mundial para esta tecnología, pero se tienen definidas las características que deberá tener, entre esta lista destacan el uso de mayores frecuencias de transmisión que las generaciones precedentes,

esto permitirá alcanzar tasas de transmisión de Gbps (Giga bits por segundo) y prácticamente ofrecer cualquier tipo de servicio, entre ellos las tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas y los vehículos autónomos (Ewa & Andrzej, 2019).

En la Tabla 3 se resumen las principales características de las diferentes generaciones de redes celulares, así como las diferentes tecnologías que los representaron en diferentes países.

Tabla 3. Principales características de las diferentes generaciones de redes celulares.

Generación	Sistema-País	Frecuencias	Modulación y otras características
1G Principios de los 80's	AMPS – USA E-TACS – Europa JTACS – Japón	800/900 MHz	Analógico-FM. Únicamente llamadas de voz. Teléfonos voluminosos, pesados y uso ineficiente de la pila. Se distinguió de sistemas anteriores por su capacidad de transferir llamadas entre células sin interrupción (<i>handoff</i>).
	IS-95 – USA	800/900 MHz	Digital-CDMA.
2G Principios de los 90's	GSM – Europa PDC – Japón IS-54 – USA PCS – UK	900 MHz 900/1800/1900 MHz	Digital-TDMA. Incorporó mensajes cortos de texto (SMS). GSM fue el primer intento por la estandarización de redes celulares a nivel global. Para hacer transferencia de datos el usuario reservaba un canal de 9.6 kbps que inhabilitaba un canal de voz, por lo que era muy caro.
2.5G	GPRS EDGE		80 kbps, transmisiones paquetizadas que permiten cobrar por la cantidad de datos transmitidos. Surgieron los mensajes multimedia (MMS).
3G Inicios de los 2000	WCDMA, CDMA2000	1885-2025 MHz 2110-2200 MHz	40-50 Mbps. Canales de 5 MHz. Hizo posible el internet en el teléfono celular. Surgimiento de los “smartphones”.
4G Antes del 2010	LTE	Alrededor de 2 GHz	Sistema OFDMA, MIMO. 100 Mbps-1 Gbps. Canales de 20 MHz. Protocolo IP.
5G Inicios del 2020		Superiores a 50 GHz, con canales entre 1 y 2 GHz	OFDMA, MIMO, Femtocélulas Requerimientos de la ITU-T: 20 Gbps en el enlace de bajada 10 Gbps en el enlace de subida Latencia de alrededor de 4 ms Conexión a redes heterogéneas sin interrupciones. Beneficios: Redes móviles de alta velocidad

			Ciudades inteligentes Internet de las cosas Vehículos autónomos
--	--	--	---

II.5 COMENTARIOS ADICIONALES

Las comunicaciones por teléfono celular son actualmente muy populares debido a que prestan servicios de comunicaciones de voz, video y datos mientras los usuarios se mantienen en movimiento. Actualmente las tecnologías de mayor uso son las 3G y 4G, éstas utilizan bandas de frecuencias cercanas a los 2 GHz. La tecnología 5G está apenas desplegándose en los países más desarrollados por lo que no existe aún un estándar internacional que cubra todas las características de lo que la ITU considera una red 5G, pero se sabe que además de las bandas de frecuencias ya utilizadas contempla además las transmisiones en frecuencias superiores a los 6 GHz (bandas de 25 GHz y superiores). Se sabe también que las potencias utilizadas por la 5G serán mucho menores a las tecnologías predecesoras, debido principalmente a la reducción de las áreas de cobertura de las células.

CAPÍTULO III

REGULACIÓN DE LAS EMISIONES DE RADIOFRECUENCIA

De acuerdo con el Marco para el desarrollo de estándares de CEM basados en la salud (CEM - Campos Electromagnéticos), los estándares de exposición “son estándares básicos para protección personal que generalmente se refieren a niveles máximos hasta los cuales es permitido la exposición total o parcial del cuerpo, proveniente de cualquier número de dispositivos.” (World Health Organization, 2006).

En este capítulo trataremos de manera muy resumida las definiciones, conceptos y aspectos más relevantes de las dos recomendaciones internacionales más importantes en la regulación de las emisiones de los equipos de radiocomunicación. Como veremos, estas dos recomendaciones tienen muchas similitudes y ambas están basadas en evidencia científica. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, por sus siglas en inglés) recomienda a los países adoptar estas recomendaciones; sin embargo, estas solo serán obligatorias si el país las incorpora dentro de su legislación, lo cual sucede en la mayoría de los casos.

Antes de analizar los estándares de emisión, iniciaremos el capítulo revisando la cantidad dosimétrica más utilizada para medir la radiación proveniente de los teléfonos celulares.

III.1 SAR, TASA DE ABSORCIÓN ESPECÍFICA

La Tasa de Absorción Específica (SAR, *Specific Absortion Rate*) es una medida de la velocidad con que el cuerpo humano absorbe energía de una fuente de emisión electromagnética. Dicho de otra manera, es la cantidad de potencia que una emisión electromagnética deposita en un tejido vivo. El SAR es uno de los parámetros que utilizan los organismos internacionales para establecer límites en las emisiones de los equipos de radiocomunicación. Los fabricantes de teléfonos celulares reportan sus niveles de SAR desde el año 2001 ya sea en sus sitios web o en los manuales de sus productos (Mobile & Wireless Forum, s.f.).

Para la definición formal del SAR primero es necesario definir la Absorción Específica. El estándar C95.1 (IEEE standard C95.1, 2019), el cuál abordaremos en más adelante, define la Absorción Específica (SA, *Specific Absortion*) como el cociente del incremental de energía (dW) absorbida por, o disipada en, una masa incremental (dm) contenida en un elemento de volumen (dV) de cierta densidad (ρ).

$$SA = \frac{dW}{dm} = \frac{1}{\rho} \frac{dW}{dV} \quad (3)$$

Con esta definición, es posible definir el SAR como la derivada con respecto al tiempo de la Absorción Específica:

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dV} \right) \quad (4)$$

El SAR puede ser calculado mediante el campo eléctrico en cualquier parte del cuerpo utilizando la siguiente relación:

$$SAR = \sigma \frac{|E|^2}{\rho} \quad (5)$$

Donde σ y ρ son la conductividad y densidad del tejido, respectivamente, y E es el valor rms del campo eléctrico. El SAR, además, está relacionado con el incremento de temperatura mediante la siguiente expresión:

$$SAR = c \left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{t=0} \quad (6)$$

Donde ΔT es el cambio de temperatura, Δt es la duración de la exposición, y c es la capacidad calorífica específica.

Evidentemente, resulta mucho más sencillo obtener el SAR mediante la medición del campo eléctrico (ecuación (5)) o el incremento de temperatura (ecuación (6)), que de la manera en que se define en la ecuación (4).

Como veremos más adelante, los organismos nacionales e internacionales, verifican que los equipos de los fabricantes cumplan con un nivel de emisión máximo, ya sea de SAR o de otro parámetro, que es seguro para la salud de los humanos.

III.2 RECOMENDACIONES DE LA ICNIRP

La Comisión Internacional de la Protección contra la Radiación No-Ionizante (ICNIRP, por sus siglas en inglés), está integrada por expertos de diferentes países y disciplinas, como biología, epidemiología, medicina, física y química, que trabajan en conjunto para evaluar los riesgos por exposición no-ionizante y elaborar recomendaciones que limiten esta exposición en los humanos. En 1998, la ICNIRP publicó las primeras recomendaciones de este tipo, la edición más reciente de estas recomendaciones fue publicada en el año 2020, cuyo título traducido al español sería: “Guía para limitar la exposición a campos electromagnéticos (100 kHz a 300 GHz)”. El principal objetivo de las recomendaciones es establecer una guía para limitar la exposición a los campos electromagnéticos de tal manera que se proporcione a las personas un alto nivel de protección contra efectos confirmados en contra de la salud causados por la exposición a la radiofrecuencia (ICNIRP, 2020). En esta sección resumiremos los detalles de estas recomendaciones, haciendo mención únicamente de los aspectos que corresponden a las frecuencias que se utilizan para las comunicaciones celulares.

Durante esta investigación se notó que todas las recomendaciones de este tipo se basan en la determinación de los niveles máximos a los que puede estar expuesto un organismo de tal manera que no se produzcan efectos adversos en la salud. En el caso de estas especificaciones, para cada efecto adverso confirmado, la ICNIRP utiliza toda la información científica disponible a la fecha para establecer un “umbral derivado”, definido como el nivel de exposición más bajo que causa un efecto en contra de la salud. Cuando la información disponible es insuficiente para determinar el umbral derivado, se establece un “umbral operacional”, que se obtiene de la relación entre un efecto de la exposición (ej. calentamiento) y el efecto de este en la salud (ej. dolor). Una vez obtenidos estos umbrales se les aplican “factores de reducción” que tienen por intención reducir los umbrales de tal manera que se consideren factores de incertidumbre como la variabilidad biológica de los individuos, la variabilidad de los factores ambientales, entre otros.

Los valores de restricción obtenidos después de aplicar los factores de reducción son referidos como “restricciones básicas”, las cuales generalmente son cantidades físicas difíciles de

medir en el interior del cuerpo. Por lo que se especifican adicionalmente los “valores de referencia” que son cantidades que se miden de manera más sencilla, y que tienen equivalencia con las restricciones básicas. Se considera que una exposición es acatadora de las recomendaciones si se muestra que cumple con las restricciones básicas o con los valores de referencia, cualquiera de los dos.

En las especificaciones se hace la distinción entre dos tipos de individuos: los “ocupacionalmente expuestos” y el “público en general”. Los ocupacionalmente expuestos son adultos que están expuestos bajo condiciones controladas en su trabajo, y por lo tanto están informados de los riesgos de la exposición y utilizan medidas para mitigar estos riesgos. El público en general consiste del resto de los individuos, de todas las edades, todos estatus de salud, y que no están enterados de la exposición en la que se encuentran o que no pueden hacer nada por mitigarla. Las especificaciones son más restrictivas con el público en general que con los individuos ocupacionalmente expuestos.

En las siguientes subsecciones se describen brevemente los efectos de la radiofrecuencia en el organismo y otros conceptos importantes que luego son tomados como base para plantear las restricciones básicas en la última subsección. Toda la información presentada a continuación fue extraída de las recomendaciones (ICNIRP, 2020).

Efectos en el organismo.

Cuando un organismo vivo es expuesto a la radiofrecuencia, una parte de la potencia es reflejada por el cuerpo y otra parte es absorbida. El resultado en el interior del organismo es un complejo patrón del campo electromagnético, el cual, además de depender del campo externo, es altamente dependiente de las propiedades físicas y dimensiones del cuerpo.

De los dos componentes de la radiofrecuencia, el campo eléctrico es el que más afecta al cuerpo. El campo eléctrico inducido en el cuerpo ejerce una fuerza en las moléculas polares (principalmente agua) y en las partículas libres con carga (mayormente iones). En ambos casos una porción de la energía es convertida en energía cinética que fuerza a las partículas polares a rotar y a las partículas cargadas a formar corrientes, estas partículas interactúan con

otras partículas polares y cargadas convirtiendo la energía cinética en calor. El calor producido puede afectar la salud de varias maneras. Además del calor los campos electromagnéticos también pueden producir estimulación nerviosa y cambios en la permeabilidad de la membrana celular; sin embargo, estos efectos se producen en frecuencias y niveles de energía que no corresponden con los usados en las comunicaciones celulares, por lo que no se incluirán en esta descripción.

Desde la perspectiva de las áreas de la salud, el interés es más hacia qué tanta potencia de radiofrecuencia es absorbida por los tejidos, ya que los procesos de calentamiento son dependientes de esta absorción, y por tanto debe ser descrito mediante una cantidad dosimétrica. Por ejemplo, la radiofrecuencia por debajo de los 6 GHz penetra los tejidos, y entonces es útil describir la exposición en términos del SAR. Por su parte, la radiofrecuencia superior a los 6 GHz es absorbida más superficialmente, y en este caso resulta más útil describir la exposición en términos de la potencia absorbida por área. La ICNIRP establece que para la medición del SAR debe ser considerada una masa de 10 g de tejido durante 6 min, salvo que se indique otra cosa.

Umbral térmicos.

Existe una carencia de investigaciones que muestren a partir de qué niveles de energía la radiación no ionizante puede causar daños en la salud debido al calentamiento. En la Guía de la ICNIRP se establecieron los umbrales basados en una amplia evidencia que muestra que por debajo los niveles especificados se asegura que no hay daños a la salud, aunque los límites exactos aún sean desconocidos.

Es importante mencionar que las restricciones están orientadas a limitar el incremento de la temperatura, mientras los efectos en la salud son debidos a la temperatura absoluta. Se sigue esta estrategia debido a que no es factible limitar la temperatura absoluta pues esta depende de muchos otros factores ajenos a la radiación electromagnética.

Las especificaciones distinguen entre aumento de temperatura de estado estable, donde la temperatura aumenta lentamente dando tiempo a que el calor se disipe, y aumento de temperatura rápido, que no da tiempo para la disipación del calor.

Temperatura general del cuerpo.

La temperatura promedio del cuerpo humano es de alrededor de 37 °C. Varios efectos pueden ocurrir si la temperatura se incrementa más de 1 °C, todos ellos son parte de la respuesta termorreguladora del cuerpo, sudoración y vasodilatación, ninguno representa un efecto adverso para la salud. De esta manera las restricciones fijan los umbrales de exposición electromagnética de tal forma que nunca produzcan un incremento superior a 1 °C. Modelos y experimentos recientes reportan que es necesaria una exposición de cuerpo completo a un SAR promedio 6 W kg⁻¹ a una frecuencia dentro del rango de 100 kHz a 6 GHz por lo menos durante una hora para inducir un incremento de un 1°C en el cuerpo de un humano adulto, desnudo e inmóvil. En los niños el SAR puede ser mayor, debido a su mayor eficiencia en la disipación de calor. Sin embargo, debido a que los datos son pocos, la ICNIRP ha limitado la exposición a un SAR de 4 W kg⁻¹ durante 30 minutos, esto para el rango de frecuencias de 100 kHz a 6 GHz. Conforme la frecuencia se incrementa, el calentamiento se vuelve más superficial, y arriba de los 6 GHz el calentamiento ocurre principalmente en la piel. El calor en la piel es mucho más fácil de remover que el de los tejidos más profundos, por lo que para el establecimiento del umbral se siguen considerando los efectos a las frecuencias menores a 6 GHz. De esta manera, el umbral de SAR que la ICNIRP ha establecido para todas las frecuencias es de 4 W kg⁻¹, para la exposición promedio de todo el cuerpo.

Temperatura local.

El calentamiento localizado excesivo puede causar dolor y daño térmico. Se ha mostrado que las temperaturas de contacto mayores a 41 °C pueden causar daños en la piel. Como la temperatura puede diferir en diferentes partes del cuerpo, la exposición debe tratarse por separado para cada región, de esta manera se definen dos tipos de tejido. El tejido Tipo-1 comprende todos los tejidos del brazo, mano, muslo, pierna, pie, oreja, córnea, cámara anterior e iris. El tejido Tipo-2 incluye todos los tejidos de la cabeza, ojo, abdomen, espalda,

tórax y pelvis, excluyendo los definidos en el Tipo-1. La temperatura normal de los tejidos Tipo-1 debe ser menor a los 36 °C y la del Tipo-2 debe ser menor a los 38.5 °C. Adoptando 41 °C como el potencialmente dañino, las restricciones de temperatura se han fijado para permitir un incremento máximo de 5 °C y 2 °C para los tejidos Tipo-1 y Tipo-2, respectivamente. Por una razón presuntamente de conveniencia, en la Guía luego cambian la nomenclatura, y ya no se agrupan por tipo de tejido si no por regiones, de tal manera que le llaman “Extremidades” a los tejidos Tipo-1 y “Cabeza y Torso” a los tejidos Tipo-2, pero siguen manteniendo los incrementos máximos de 5 °C y 2 °C que ya se habían comentado. Es importante mencionar que la región "Cabeza y torso" se incluyen, además de los tejidos ya mencionados, a los testículos y al feto.

A la fecha de publicación de la guía, la evidencia científica muestra que para frecuencias inferiores a 6 GHz se requiere un SAR (10 g) de al menos 20 W kg⁻¹ para exceder el umbral-operacional en la región Cabeza y Torso, y uno de 40 W kg⁻¹ para exceder el de la región Extremidades.

En el caso de las frecuencias mayores a 6 GHz, como la absorción de la radiofrecuencia se da principalmente en la piel, se utiliza la densidad de potencia para definir el umbral, medida en un área de 4 cm² y un tiempo de 6 min. En cuanto al tipo de tejido la piel se ha considerado dentro del Tipo-1 por lo que se permite un incremento máximo de 5 °C. Bajo estas consideraciones se especifica un umbral de 200 W m² para frecuencias mayores a 6 GHz.

Aumentos rápidos de temperatura.

Para ciertos tipos de exposición, los incrementos rápidos de temperatura pueden producir *hot-spots* localizados, y debido a su rapidez no dan tiempo para que el calor se disipe o se distribuya a tejidos cercanos. Para considerar esta distribución heterogénea de la temperatura, se requiere hacer un ajuste a la exposición de estado estable. Se agregan aquí ecuaciones donde se limita temporalmente la exposición. Por ejemplo, para el rango de 400 MHz a 6 GHz, la restricción es en términos de la absorción de energía específica (SA) de una masa cúbica de 10 g, donde la SA se restringe a:

$$7.2 \left[0.05 + 0.95 \left(\frac{t}{360} \right)^{0.5} \right] \text{kJ kg}^{-1} \text{ para "Cabeza y torzo"} \quad (7)$$

$$14.4 \left[0.025 + 0.975 \left(\frac{t}{360} \right)^{0.5} \right] \text{kJ kg}^{-1} \text{ para "Extremidades"} \quad (8)$$

Tabla de restricciones básicas.

En la Tabla 4 se muestra las restricciones básicas de la Guía, la cual es la información resumida de lo que ya se presentó en las subsecciones anteriores, a las cuales se le han aplicado los factores de reducción. Se observa que las restricciones son más estrictas para la exposición de cuerpo completo del público en general, y la menos restrictiva es la exposición de las extremidades en ambiente ocupacional. Se observa también que la exposición de cuerpo completo está muy por debajo de la exposición local, esto significa que en regiones localizadas la exposición puede ser más alta que el promedio de todo el cuerpo, y aun así no causar daños en la salud. De nuevo mencionamos que las recomendaciones son mucho más extensas, y que aquí solo mostramos los rangos de frecuencias que corresponde al uso de dispositivos celulares.

Tabla 4. Restricciones básicas por efectos térmicos.

Tipo de exposición	Incremento máx. de temperatura	Umbral derivado u operacional	Ocupacional		Público en general	
			Factor de reducción	Restricción básica	Factor de reducción	Restricción básica
Exposición de cuerpo completo, 100 kHz a 300 GHz	1 °C	SAR de 4 W kg ⁻¹ promedio 30 min.	10	SAR de 0.4 W kg ⁻¹	50	SAR de 0.08 W kg ⁻¹
Exposición Local de Cabeza y Torso, 100 kHz a 6 GHz	2 °C	SAR de 20 W kg ⁻¹ promedio 6 min.	2	SAR de 10 W kg ⁻¹	10	SAR de 2 W kg ⁻¹
Exposición Local, Extremidades, 100 kHz a 6 GHz	5 °C	SAR de 40 W kg ⁻¹ promedio 6 min.	2	SAR de 20 W kg ⁻¹	10	SAR de 4 W kg ⁻¹

Como se mencionó con anterioridad, adicionalmente a las restricciones básicas en las recomendaciones se especifican valores de referencia, los cuales son mucho más sencillos de medir. Como valores de referencia se utilizan principalmente las intensidades del campo

eléctrico y campo magnético, y la densidad espectral de potencia, todas ellas medidas al incidir en el individuo. Siendo la densidad espectral la que se utiliza en el rango que nos interesa en las comunicaciones celulares, de 2 a 6 GHz.

III.3 ESTÁNDAR IEEE C95.1

Otra especificación muy importante en el ámbito de la salud y radiofrecuencia es el estándar IEEE C95.1, éste “especifica los criterios y límites para proteger contra efectos adversos a la salud humana asociados con la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos en el rango de frecuencias de 0 a 300 GHz”. La versión más reciente del estándar, del año 2019, es una actualización de los precedentes, principalmente del anterior del 2005, y está basado en la información científica actualizada. Como se verá, el estándar C95.1 guarda muchas similitudes con las Guía de la ICNIRP descrito en la sección anterior. La información que se mostrará en lo que resta de esta sección fue extraída en su totalidad de las especificaciones (IEEE standard C95.1, 2019).

Se menciona en el estándar sobre los dos posibles efectos de la exposición a los campos electromagnéticos: la electroestimulación, asociado con efectos desagradables o dolorosos; y el calentamiento de los tejidos, que puede producir daños temporales o permanentes. En la Tabla 5 se muestran los rangos de frecuencia asociados a cada uno de estos efectos biológicos, se aprecia ahí que la electroestimulación se presenta a frecuencias bajas y el calentamiento de tejidos a frecuencias altas, lo cual concuerda con lo mencionado en la Guía ICNIRP.

Tabla 5. Posibles efectos biológicos por rango de frecuencias.

Rango de frecuencias	Efecto predominante
Menor a 100 kHz	Electroestimulación
De 100 kHz a 6 GHz	Ambos: Electroestimulación y calentamiento
Mayor a 6 GHz	Calentamiento

Como se observa en la Tabla 5 las frecuencias en las que operan las comunicaciones celulares producen electroestimulación y calentamiento. De igual manera que en la sección anterior,

en ésta nos enfocaremos en los efectos térmicos, ya que para que se produzca electroestimulación se requieren energías de radio mucho más altas que las utilizadas en las comunicaciones celulares.

En estándar C95.2 tiene mucho paralelismo con la Guía ICNIRP, por ejemplo, en el estándar se utilizan dos tipos de límite de exposición a los que le llaman Límite de Exposición Dosisimétrico (DLR, por sus siglas en inglés) y Nivel de Exposición de Referencia (ELR, por sus siglas en inglés), cuyo concepto y uso son idénticos a las “restricciones básicas” y los “valores de referencia” de la Guía. De igual manera en el C95.1 se utilizan “factores de seguridad” que se aplican para considerar la incertidumbre en los estudios, éstos en la Guía ICNIRP se llaman “factores de reducción”. En la Tabla 6 se enlistan los términos usados en el estándar C95.2 y su terminología equivalente en la Guía ICNIRP.

Tabla 6. Comparación de terminología entre el estándar IEEE C95.1 y la Guía ICNIRP.

Término IEEE C95.1	Descripción del estándar IEEE C95.1	Equivalente de la Guía ICNIRP
Límite de Exposición Dosisimétrico (DLR)	Límite de exposición expresado como fuerza del campo eléctrico dentro de un tejido (< 100 kHz), SAR (100 kHz a 6 GHz), o densidad de potencia epitelial (>6 GHz). Definidos junto con los requerimientos para el promedio espacial y temporal, y también se proporcionan márgenes de seguridad adecuados.	Restricción básica
Nivel de Exposición de Referencia (ELR)	Para cada DRL se especifica un ERL correspondiente. Los ERL proveen una cantidad que pueda ser obtenida mediante una medición más directa y sencilla, y cuyo valor es determinado de tal manera que si el ERL no se excede su correspondiente DRL tampoco es excedido. Especificados como fuerza de los campos electromagnéticos, densidad de potencia, corriente inducida o de contacto, o voltaje de contacto.	Valor de referencia
Factor de seguridad	Un divisor (≥ 1) aplicado al nivel de exposición que causa un efecto adverso, usado para establecer un DRL. El factor de seguridad incluye la variabilidad biológica de los sujetos, incertidumbre acerca de los efectos por condiciones patológicas o tratamientos farmacéuticos, incertidumbre en los modelos, y variaciones en temperatura y humedad.	Factor de reducción
Ambiente sin restricción	Un ambiente en el cual la exposición no excede el DRL que indica el programa de seguridad, y que sirve como el límite de exposición para el público en general, los cuales ignoran o no tienen control de la exposición en la que se encuentran sometidos. Tiene asociado un nivel sin restricción (referido también como nivel bajo).	Público en general
Ambiente con restricción	Un ambiente en el cual la exposición puede exceder el DLR de un ambiente sin restricción. Este ambiente está restringido a personas que, por su oficio, por prescripción médica o algún otro motivo, están conscientes de que están expuestos a la radiación electromagnética. Tiene asociado un nivel con restricción (referido también como nivel alto).	Individuos Ocupacionalmente expuestos

En el estándar IEEE C95.1 se define además el “Programa de seguridad” como un sistema organizado de políticas, procedimientos, prácticas y planes diseñados para contribuir al cumplimiento de los límites de exposición asociados con los campos electromagnéticos, voltajes de contacto, y corrientes inducidas y de contacto. El programa incluye entrenamiento de concientización, implementación de medidas de protección tales como señalización y el uso de equipo de protección personal, respuesta a incidentes, y evaluación periódica de la efectividad del programa. Los programas de seguridad deben ser aplicados siempre que se detecte que los límites del estándar puedan ser excedidos en determinado ambiente. Mientras que los programas de seguridad se aplican a las fuentes electromagnéticas que están fijas, los teléfonos celulares y los radios de dos vías están sujetos a otros requerimientos para limitar el psSAR (SAR pico espacial) en los tejidos. Los fabricantes deben seguir los procedimientos que aseguren el cumplimiento de los DRL para los niveles con y sin restricción.

DLR entre 100 kHz-300 GHz

De igual manera que en la Guía, en las especificaciones IEEE C95.1, mediante evidencia científica, se concluye que un SAR promedio de 4 W kg^{-1} produce un aumento de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ en la temperatura del cuerpo, y que por cuestiones de incertidumbre en ningún caso se debería permitir un SAR promedio superior a 0.4 W kg^{-1} . En la

Tabla 7 se muestran los límites DLR para exposición de cuerpo completo y local en el rango que nos incumbe.

Tabla 7. DLRs para el rango 100 kHz – 300 GHz

Tipo de exposición	Límite del SAR de un ambiente sin restricciones	Límite del SAR de un ambiente con restricciones	Condición de promediado
Exposición de cuerpo completo	0.08 W kg^{-1}	0.4 W kg^{-1}	30 min.
Exposición de la cabeza y torso	2 W kg^{-1}	10 W kg^{-1}	6 min. en 10 g de tejido
Exposición de las extremidades y orejas	4 W kg^{-1}	20 W kg^{-1}	6 min. en 10 g de tejido

Si comparamos los límites de la Tabla 4 y la Tabla 7 observamos que los límites de la IEEE son exactamente los mismos que los de la ICNIRP, solo que con diferentes nombres. Una diferencia de entre la Guía ICNIRP y el estándar IEEE C95.1, es que este último sí se especifican los ERL y en la Guía se menciona la existencia de sus equivalentes valores de referencia, pero en ninguna parte de la Guía aparecen las cantidades. Durante la lectura de ambas especificaciones concluimos que el estándar IEEE C95.1 es el complemento de la Guía ICNIRP, ya que notamos que la Guía ICNIRP se dedica principalmente a explicar las bases científicas de los límites que se obtienen, mientras que en el estándar IEEE C95.1 es más detallado en cuanto a los valores de los límites y los procedimientos para medirlos en diferentes escenarios. Esta conclusión nos parece un tanto lógica, ya que la ICNIRP tiene sus bases en la OMS que es una institución que vela la salud, mientras que la IEEE es un organismo conformado por ingenieros.

III.4 LÍMITES APLICADOS A LOS TELÉFONOS CELULARES

De acuerdo con la FCC (*Federal Communications Commission*) de los Estados Unidos: “Las pruebas de medición de la SAR utilizan modelos estandarizados de la cabeza y del cuerpo humano, llenos con líquidos que simulan las características de absorción de RF de los diferentes tejidos. [...] Cada teléfono celular es sometido a pruebas mientras transmite a su máxima potencia, en todas las bandas de frecuencia en que opera y en varias posiciones específicas apuntando a la cabeza y cuerpo del maniquí [...]. Una sonda robótica efectúa una serie de mediciones del campo eléctrico en ubicaciones específicas precisas, con base en un diseño cuadrículado, en la cabeza y el torso del maniquí. Para la autorización final y como parte del informe de las pruebas para aprobación de equipos, se envían los datos recabados. Sin embargo, en la autorización final se incluyen *sólo los valores SAR más altos* para cada banda de frecuencia, para demostrar que los aparatos cumplen con las pautas de la FCC para energía de RF.” (FCC Consumer and Governmental Affairs Bureau, 2017). Aunque este es el procedimiento descrito por la FCC de los Estados Unidos, es similar en el resto de los países, ya que son acuerdos internacionales de la OMS y la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones).

En México el equivalente a la FCC es el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT), el cual establece en el acuerdo IFT-012-2019 las especificaciones técnicas para el cumplimiento de los límites máximos de la emisión electromagnética de los equipos de telefonía celular, entre otros (IFT, 2020). Al inicio de las especificaciones del IFT se menciona que este acuerdo sigue las recomendaciones de la ICNIRP, por lo que tomaremos lo mencionado por la FCC como referencia.

En la Tabla 8 se muestran los valores máximos del SAR que se reporta en los manuales de teléfonos celulares de marcas conocidas. Se observa que, tal y como se dijo al inicio de esta sección, y de acuerdo con la FCC, las compañías solo reportan el valor máximo de SAR que se midió durante la prueba. En algunos de estos manuales se establece que el valor límite del SAR es de 2 W kg^{-1} , el cual de acuerdo con la Tabla 4 y la Tabla 7 corresponde a la exposición local de cabeza y torso. Algo que llama la atención es que los límites de la Guía ICNIRP son valores promediados en 30 minutos, y en el manual de los teléfonos se reporta el valor máximo medido en las pruebas; sin embargo, observamos en la tabla que en ningún caso el valor pico supera el límite de los 2 W kg^{-1} lo cual asegura que el promedio siempre es inferior a este límite.

Tabla 8. Valores del SAR reportados en los manuales de algunos teléfonos celulares.

Marca	Modelo	SAR máximo reportado
Apple	iPhone 13 A2482	1.6 W kg^{-1}
Motorola	Moto G60	Cabeza: 0.41 W kg^{-1} Cuerpo: 1.65 W kg^{-1}
Samsung	Galaxy SM-A725M	Cabeza: 0.43 W kg^{-1} Cuerpo: 0.58 W kg^{-1}
Sony	Xperia Z1 C6903	0.773 W kg^{-1} (10 g)
LG	LG K62 LM-K525HMW	Cabeza: 1.10 W kg^{-1} (1g) Cuerpo: 1.29 W kg^{-1} (1g) a10 mm
Nokia	Nokia 6.2 TA-1200	Cabeza: 0.975 W kg^{-1} (10g) Cuerpo: 1.420 W kg^{-1} (10g)

Otra razón por la que podemos confiar en que los límites de la ICNIRP no son rebasados por los teléfonos celulares, es que, debido al mismo concepto de la telefonía celular, y sobre todo a partir de las tecnologías 3G, durante la operación normal los teléfonos muy rara vez transmiten a su máxima potencia, esto se hace así para ahorrar batería y para reducir la

interferencia a teléfonos cercanos. De esta observación se sigue que el valor de SAR reportado por el fabricante solo asegura que el límite ICNIRP no se rebasa, pero no necesariamente significa que un teléfono que reporte un SAR pequeño genere una exposición superior a uno que reporte un SAR más alto, ya que el valor pico reportado se obtuvo con el teléfono transmitiendo en su máxima potencia y no bajo condiciones normales de operación.

III.5 COMENTARIOS ADICIONALES

El gobierno de cada país tiene la facultad y la obligación de regular y vigilar la potencia de todas las transmisiones de radiofrecuencia. En primer lugar, esto es necesario debido a que la radiofrecuencia es un recurso compartido por muchos usuarios y se debe evitar que estos interfieran entre sí. En segundo lugar, la regulación es necesaria por las afectaciones en el estilo de vida y salud de los ciudadanos. Generalmente estas regulaciones son emitidas por organismos internacionales y adoptadas por los gobiernos locales, esto por un lado proporciona un marco de referencia para las naciones que no cuentan con los recursos ni los expertos especializados para realizar sus propios estudios, y por el otro garantiza a los fabricantes compatibilidad de los equipos para que puedan comercializarse en diferentes países.

Se vio que las dos recomendaciones internacionales se basan en evidencia científica para establecer los límites en la energía que se debe emitir. Se vio también que la energía en la que los dispositivos celulares transmiten está muy por debajo de estos límites, por lo que en teoría deberíamos utilizarlos con confianza. Sin embargo, es importante señalar que ambas recomendaciones se basan en que el único efecto de la radiación no-ionizante es el calentamiento de los tejidos. Surge aquí la interrogante de si en el largo plazo alguno de los otros efectos que no se tomó en cuenta pudieran tomar importancia. Para esto en el siguiente capítulo se revisan algunos estudios epidemiológicos que, con evidencia epidemiológica, tratan de responder a esta cuestión.

CAPÍTULO IV

EFFECTOS EN LA SALUD

En este capítulo se revisan los principales estudios que se han realizado referente a los efectos de la exposición a la radiación electromagnética por el uso de teléfonos celulares. De los posibles efectos solo nos hemos enfocado en revisar en cáncer, debido a que es sobre el que se han hecho más investigaciones y el que más preocupa a las instituciones de salud pública. El estudio más grande realizado lleva por nombre Interphone, y éste junto con otros es retomado por los comités de la OMS para clasificar esta exposición dentro de las categorías de carcinogenicidad.

IV.1 CLASIFICACIÓN DE AGENTES CANCERÍGENOS DEL IARC

El Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC – *International Agency for Research of Cancer*) es un organismo de la OMS, creado en 1965. El IARC tiene su sede en Lyon, Francia, y en él colaboran investigadores de distintos países para obtener datos científicos destinados a la prevención del cáncer. El IARC produce datos indispensables para el desarrollo de políticas y de directivas, tanto para la OMS como para los gobiernos nacionales, y apoya la puesta en marcha de programas nacionales eficaces en la prevención y la lucha contra el cáncer.

El IARC de manera permanente se encuentra estudiando posibles agentes cancerígenos, a la fecha se han estudiado más de mil agentes que incluyen sustancias químicas, físicas y biológicas, condiciones de trabajo, factores dietéticos y de estilo de vida, entre otros (IARC, 2020). Para que un agente sea candidato de estudio del IARC tiene que existir exposición de los humanos al agente y alguna evidencia que sugiera su “carcinogenicidad”. Se reúne evidencia de tres tipos: estudios epidemiológicos en humanos, experimentación con animales y mecanismos de actuación cancerígena. Una vez reunida la evidencia, el grupo de trabajo la analiza y clasifica el agente en uno de los grupos de la Tabla 9 según el riesgo que represente (Samet, y otros, 2020).

Tabla 9. Clasificación de cancerígenos del IARC.

Grupo	Nombre	Descripción
Grupo 1	Cancerígeno en humanos	Esta categoría se les asigna a los agentes a los que se les ha encontrado <i>suficiente evidencia</i> de carcinogenicidad en humanos.
Grupo 2A	Probable cancerígeno en humanos	En esta categoría se incluyen a los agentes que cumplen <i>dos</i> de las siguientes tres opciones: <ul style="list-style-type: none"> • Limitada evidencia de carcinogenicidad en humanos • Suficiente evidencia de carcinogenicidad en animales. • Suficiente evidencia de que el agente exhibe las características claves de un cancerígeno.
Grupo 2B	Posible cancerígeno en humanos	En esta categoría se incluyen a los agentes que cumplen <i>una</i> de las siguientes opciones: <ul style="list-style-type: none"> • Limitada evidencia de carcinogenicidad en humanos • Suficiente evidencia de carcinogenicidad en animales. • Suficiente evidencia de que el agente exhibe las características claves de un cancerígeno.
Grupo 3	No clasificable como cancerígeno	Cuando no cumplió los criterios de las otras categorías.
Grupo 4	Probablemente no cancerígeno en humanos	Cuando la evidencia sugiere que el agente no es cancerígeno ni en humanos ni en animales experimentales.

Toda la información reunida sobre los estudios del agente y el veredicto de su clasificación como carcinógeno se publica en una monografía que de manera gratuita puede ser consultada en la página de la IARC. Es importante señalar que las categorías de la IARC se refieren únicamente a la solidez de la evidencia de que alguna exposición es carcinogénica y no a la “potencia” de su carcinogénesis. Más adelante, en este mismo capítulo, en la sección IV.3 hablaremos acerca de la monografía referente a la radiación electromagnética, la cual abarca a la radiación de las comunicaciones celulares.

IV.2 ESTUDIO INTERPHONE

El estudio Interphone (IARC, 2012) es un estudio de casos y controles¹ iniciado en el año 2000, y cuyos últimos análisis fueron publicados en el 2012. El estudio fue llevado a cabo en los 16 centros médicos más importantes de los siguientes trece países: Australia, Canadá, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Israel, Italia, Japón, Nueva Zelanda, Noruega, Suiza y Reino Unido. Las personas estudiadas se encontraban entre los 30 y los 59 años, se seleccionaron de esta edad por tener mayor probabilidad de haber utilizado dispositivos celulares entre mediados de los 80's y los 90's. Hasta la fecha es el estudio de este tipo más grande que se ha hecho y el cubre mayor tiempo, ya que considera por lo menos 10 años de exposición.

Padecimientos estudiados.

Para los casos inicialmente se tomaron en cuenta cuatro tipos de tumores que, por la región de la cabeza en la que se localizan, tienen mayor probabilidad de estar asociados al uso del celular. A continuación, se describen brevemente los tipos de casos considerados en el estudio:

- El mayor número de casos estudiados fue de glioma, el cual es el tumor que se desarrolla en el interior cerebro o en la médula espinal.
- El segundo tipo de casos estudiados fue de meningioma, el cual se presenta en las meninges, siendo éstas las membranas que protegen al sistema nervioso central.
- El tercer tipo de casos fue el tumor de glándula parótida. Las parótidas son las glándulas salivales más voluminosas, localizadas una a cada costado de la cara por debajo y hacia enfrente de las orejas.
- El neuroma acústico, un tumor de crecimiento muy lento que se desarrolla en el nervio que conecta el oído interno con el cerebro, las ramas de este nervio afectan el equilibrio y la audición.

¹ Tipo de estudio en el que se seleccionan sujetos de una población que tengan determinado padecimiento (denominados casos) y otros que no lo tengan (llamados controles). Luego se investiga el nivel de exposición de ambos grupos a cierto factor de interés, con la finalidad de determinar si hay alguna asociación entre el padecimiento y la exposición.

Durante la implementación de los estudios se decidió descartar los casos de tumor de glándula parótida debido a su baja ocurrencia en los centros involucrados. En total se estudiaron 6,222 casos y 7,779 de controles. En la Tabla 10 se desglosa el número de casos de cada padecimiento. La diferencia entre el número de casos y el número de controles se debe a que en algunos centros médicos se tenían dos controles emparejados a un mismo caso.

Tabla 10. Desglose del número de casos y controles por padecimiento del estudio Interphone.

Padecimiento	Número de casos	Número de controles
Glioma	2,708	2,972
Meningioma	2,409	2,662
Neuroma acústico	1,105	2,145
Total	6,222	7,779

Metodología.

Para realizar el estudio (Cardis, y otros, 2007), en primer lugar, se seleccionaron los casos de entre los pacientes que estaban siendo atendidos en los centros médicos participantes. En la mayoría de los casos (87%) la información fue recabada mediante entrevista directa con el paciente, y en el resto con una persona cercana a él que lo representara. Con el fin de reducir los sesgos de memoria, los cuestionarios del estudio permitían al entrevistado responder usando rangos en vez de cantidades o fechas exactas.

Algunos de los casos fueron categorizados como “usuarios regulares”, definidos como aquellos con promedio de al menos una llamada por semana por un periodo de seis meses o más. A los usuarios regulares, se les preguntó sobre su patrón inicial de uso, operador de red, número promedio de llamadas, y cualquier cambio posterior. También se obtuvo un estimado de la porción de tiempo que se utilizó el celular en zonas urbanas, suburbanas o rurales; la porción de tiempo que se usó de manera estacionaria o sobre un vehículo; la porción de tiempo que se usó dispositivos de manos-libres y finalmente la lateralidad. Es conveniente aclarar ésta última, la lateralidad se refiere al lado preferido al realizar o responder una llamada por móvil: el entrevistado se etiquetaba como “ipsilateral” si el tumor se encontraba en el mismo lado en que usualmente responde la llamada o no se tenía un lado preferido; por el

contrario, el entrevistado se etiquetaba como “contralateral” si el tumor y el lado preferido eran opuestos. Los casos con tumores ubicados en el centro de la cabeza no se consideraron en los análisis de lateralidad.

Por otro lado, se buscaron aleatoriamente los controles tratando de emparejarlos con los casos en fecha de nacimiento (con un margen de 5 años), sexo, región geográfica y patrones de uso del celular y de otros dispositivos de radio, así como exposición ocupacional a campos electromagnéticos y a otros factores de riesgo asociados a la enfermedad de interés (consumo de tabaco, exposición a radiación ionizante, historial familiar). Considerando que hay una tendencia a que la memoria de los individuos sea influenciada por el uso actual o reciente, el caso y su control asociado se entrevistaron en fechas cercanas.

De los cuestionarios se obtuvieron principalmente dos variables de exposición: la duración promedio de llamada y el número de llamadas acumuladas, todas ellas sobre el total de tiempo de análisis y sobre una ventana temporal específica. Con esta información se estimó la cantidad total de tiempo que el entrevistado había utilizado el teléfono celular. Debido a que los síntomas de una enfermedad pueden afectar los patrones de uso del celular, el año anterior a la detección de la enfermedad se descartó del periodo de exposición, tanto para los casos como para sus respectivos controles.

La otra variable de exposición que se obtuvo es la cantidad de energía de RF absorbida por diferentes áreas del cerebro de los casos. Para esto, se desarrolló y se validó un modelo para estimar la exposición. El algoritmo combina las respuestas de los cuestionarios con la información sobre la localización del tumor y los factores que modifican la cantidad de energía emitida por el teléfono, como el modelo y compañía telefónica.

Medida de asociación padecimiento-exposición.

Como medida de asociación entre el padecimiento y la exposición se utilizó la razón de momios (OR, por su nombre en inglés *Odds Ratio*). La OR se obtiene dividiendo dos cocientes: en el numerador se tiene la razón de los casos expuestos (a) entre los casos no expuestos (c)

y en el denominador se tiene la razón de los controles expuestos (b) entre los controles no expuestos (d) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$OR = \frac{a/c}{b/d} = \frac{ad}{bc} \quad (7)$$

Esta medida se utiliza en los estudios de casos y controles para estimar la asociación de la enfermedad y el factor de riesgo (Villa, Moreno, & García, 2012). En el estudio se calcularon varios OR bajo distintas combinaciones de niveles y circunstancias de exposición, en todos ellos el grupo de no expuestos se tomó a los entrevistados que no tenían teléfono celular o que lo usaban menos una vez por semana. Un valor de OR igual a uno denota una ausencia de causalidad entre el tumor y el uso del móvil. Conforme el OR aumenta alejándose de la unidad se interpreta como una mayor asociación entre el uso del celular y los tumores estudiados. Los valores de OR inferiores a la unidad implicarían que la exposición actúa como protector ante el padecimiento, lo cual no es posible, ya que no hay ningún mecanismo fisiológico que respalde esta conclusión.

Resultados.

La mayoría de los entrevistados resultaron ser usuarios moderados y regulares de los teléfonos celulares, tanto los casos como los controles. Llamaremos a estos usuarios “moderadamente expuestos”, o “de exposición moderada”. Un grupo más reducido de los entrevistados resultaron ser usuarios excesivos de los teléfonos celulares, a estos los identificaremos como usuarios “altamente expuestos”.

En el caso de los usuarios con exposición moderada, para los tres tumores estudiados y bajo todos los escenarios, se obtuvieron valores de OR inferiores a la unidad. Al no ser posible que la exposición proteja contra el padecimiento, el estudio concluye que es altamente probable que no haya asociación entre la exposición moderada y padecer alguno de los tres tipos de tumor, y concluye también que posiblemente haya un sesgo sistemático en la recopilación de la información que hace inferir erróneamente que en algunos casos la exposición moderada proteja contra los tres tipos de tumores. El principal posible sesgo que se asocia a este resultado es el debido al muestreo, dado que los casos fueron reclutados de los pacientes que

estaban siendo atendidos en los hospitales seguramente existen casos que no se detectaron ni se atendieron, y estos carecen de representación en las muestras.

Los usuarios altamente expuestos por su parte sí dieron valores de OR superiores a la unidad, aunque tampoco fueron muy elevados. El glioma y el meningioma por lo general siguieron las mismas tendencias, pero para el glioma resultaron valores OR más altos en algunos escenarios. Se menciona en el análisis que esta similitud de resultados sugiere un mismo origen en ambos tipos de tumor o que los datos tienen el mismo sesgo. Se observa una tendencia no consistente en los valores de OR para el glioma, por lo que los valores más altos de OR se atribuyen a sesgos de información proveniente de principalmente de dos fuentes: 1) los tumores de cabeza afectan la memoria y 2) se observó que los casos tienden a reportar datos que buscan justificar su padecimiento. Esto último se corroboró con un estudio que detectó que los casos tendían a sobreestimar el número de horas de uso del celular.

Para los estudios de neuroma acústico, de igual manera, los usuarios altamente expuestos arrojaron valores de OR superiores a la unidad. Y al igual que para el glioma, las tendencias mostraban fluctuaciones conforme la exposición aumentaba, sugiriendo los sesgos de información mencionados en el párrafo anterior.

Los análisis de lateralidad solo fueron significativos para el neuroma acústico, ya que arrojaron valores de OR más altos para los casos ipsilaterales que para los contralaterales, pero solo para los usuarios con alta exposición. De igual manera los resultados sugieren la existencia de sesgo. Al sesgo de selección de los casos, ya mencionado arriba, se le agrega el hecho de que, en los tumores del oído, el uso del celular puede facilitar la detección temprana por la misma afectación a la audición, de esta manera teniendo una sobrerrepresentación de casos usuarios de celular.

Se menciona en el estudio que en todos los análisis es posible otro origen del sesgo de información: los usuarios poco frecuentes subestiman el uso del celular y los demasiados frecuentes lo sobreestiman. Además de que, como ya se mencionó, los casos tienden a sobreestimar más que los controles. Adicionalmente en el neuroma acústico, se detectó que el lado preferido

fue erróneamente recordado y esto puede ser afectado por los primeros síntomas en el oído. Esto fue corroborado con estudios de validación.

En conclusión, no se observa asociación entre los tres tumores estudiados y el uso moderado del celular. En los casos de exposición excesiva sí se observa una asociación con el padecimiento de los tumores; sin embargo, se observan inconsistencias en estos resultados que sugieren la existencia de sesgos. Es pertinente mencionar que estudios previos, de menor envergadura, obtuvieron resultados similares a los encontrados en el estudio Interphone.

Al final del estudio se menciona que, aunque los estudios abarcaron por lo menos 10 años, sigue siendo posible que el intervalo de tiempo entre la proliferación del uso de los teléfonos celulares y la fecha en que se realizó el estudio sea demasiado corto como para que se observe la posible asociación entre los padecimientos y la exposición.

IV.3 MONOGRAFÍA DEL IARC SOBRE RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Como primer paso para la prevención, el programa de monografías la IARC busca identificar las causas del cáncer en humanos. Las monografías son revisiones críticas y evaluaciones de carcinogénesis de una amplia variedad de agentes de exposición. No tienen objetivo de realizar recomendaciones con respecto a la regulación o legislación, ya que eso es responsabilidad de los gobiernos.

Esta monografía en específico (IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2013) aborda el asunto general de si la radiación de RF causa cáncer en humanos, pero no exclusivamente sobre teléfonos celulares, sino también la radiación de otras fuentes de RF en el rango de 30 kHz a 300 GHz. Se estudian tres tipos de exposición a la RF: a) fuentes ambientales tales como estaciones base, antenas de radiodifusión, medidores inteligentes y aparatos de aplicaciones médicas; b) fuentes ocupacionales tales como calentadores de inducción y dieléctricos de alta frecuencia y radares pulsados de alta potencia; c) el uso de dispositivos personales como teléfonos celulares, teléfonos inalámbricos, dispositivos Bluetooth y radios amateur. En esta sección nos limitaremos a presentar todo lo que se refiera a la exposición de teléfonos celulares y su relación con el cáncer.

Antes de continuar es importante mencionar que la monografía está enfocada en detectar un potencial incremento en el riesgo de cáncer por la exposición a la RF, pero no prevé una evaluación cuantitativa de ningún riesgo de cáncer, ni discute ningún otro tipo de potenciales efectos en la salud de la RF.

Exposición por uso del teléfono móvil

De acuerdo con la monografía el uso del celular es la principal fuente de exposición del público en general, comparado con las otras ya mencionadas. Específicamente la mayor exposición es en el momento en el que se realizan llamadas y el aparato se encuentra sostenido cerca de la oreja a menos de 10 cm, evidentemente los órganos de la cabeza son los mayormente expuestos. Las pruebas que se realizaron permitieron determinar que las frecuencias en las que operan los teléfonos celulares (alrededor de 2 GHz) tienen muy poca penetración, por lo que el mayor efecto es sobre la piel y los órganos más próximos a ésta. Nótese que estos resultados coinciden con el tipo de tumores estudiados por Interphone de la sección anterior (IV.2).

Aunque se han publicado muchos estudios experimentales sobre los efectos biológicos no-térmicos de la RF, muchos de ellos concluyen que teóricamente es improbable que se presenten sin producir un incremento en la temperatura del cuerpo. Esto coincide con la fundamentación de los límites recomendados por las normas abordadas en el capítulo III.

Otro de los análisis que se discuten son referentes a las posibles modificaciones en la exposición a la RF por la modernización de los teléfonos celulares. Como puntos más relevantes se menciona que a partir de las tecnologías 3G los esquemas de modulación de señales de radio permiten que los dispositivos transmitan a potencias mucho menores que las generaciones precedentes. Otra cuestión que se menciona es que cada vez es menos frecuente que se hagan llamadas por el celular ya que se ha incrementado la preferencia por los mensajes de texto y de voz. También se discute acerca del uso de tecnologías de manos libres, como dispositivos Bluetooth, que tienen el efecto de disminuir la exposición al mantener el móvil alejado de la cabeza mientras se realizan llamadas. Estas observaciones nos permiten confiar en la vigencia de los resultados de los estudios en los que se basa la monografía, los cuales

es altamente probable que se hayan realizado en los escenarios de peor de los casos, cuando la exposición por teléfono celular era más alta de lo que es ahora.

Cáncer en humanos

Son muchos los estudios revisados en la monografía en los que se investiga sobre la relación entre uso del celular y el cáncer en humanos, siendo el estudio Interphone el de mayor cobertura y relevancia (revisado en la sección anterior, IV.2). No mencionaremos aquí más resultados de este tipo ya que todos los estudios que se revisaron en la monografía tienen conclusiones similares al estudio Interphone.

Cáncer en animales experimentales

La monografía revisa los resultados de varias pruebas realizadas en ratas y ratones experimentales. Algunos de estos roedores fueron genéticamente modificados para ser propensos a desarrollar algún tipo específico de cáncer. Otros fueron expuestos a sustancias químicas y a agentes ionizantes (como radiación UV) con las que se induce el desarrollo de tumores. Todos los experimentos revisados por la monografía consistían en someter a los individuos a una dosis diaria de exposición de radiofrecuencia durante cierta cantidad de tiempo (2 horas diarias, por ejemplo), durante varios meses. En algunos estudios los individuos se dividían en grupos con diferentes niveles de exposición, pero en todos siempre existía un grupo que no se exponía a la radiofrecuencia. Algunos de los estudios hacían un estudio de la salud de los individuos al final del experimento, mientras que otros lo hacían varias veces durante el desarrollo del experimento. Algunos hacían revisiones por tacto, otros mediante la disección y otros usaban equipos especializados.

La mayoría de los estudios no encontró una asociación entre el desarrollo de los tumores y la exposición a la radiofrecuencia, ni tampoco una influencia en la evolución del desarrollo de los tumores, ni en la esperanza de vida, ni ninguna otra cuestión relacionada con la salud de los individuos. Hubo, unos cuantos estudios en los que sí se obtuvo una correlación entre la exposición a la radiofrecuencia y el desarrollo de los tumores; sin embargo, en casi todos

ellos hubo un estudio bajo las mismas condiciones que arrojó el resultado contrario, por lo que estos resultados carecen de repetitividad.

Otros datos relevantes

Se revisaron números estudios *in vivo* con animales experimentales y estudios *in vitro* de cultivos de células tanto humanas como animales que fueron expuestos a la radiación de radiofrecuencia con el fin de estudiar los diversos mecanismos que pueden provocar el desarrollo de tumores, tales como: daño en los genes, ruptura y daño del ADN, malfuncionamiento del sistema inmune, alteraciones en la comunicación celular y otros más. La mayoría de estos estudios no encontraron una asociación entre la exposición y la alteración de los mecanismos. Los que sí encontraron una asociación positiva fueron descartados, ya que en gran parte de ellos las alteraciones no pudieron ser deslindadas de los efectos térmicos, mientras que otros mostraban inconsistencias o no poder ser replicados.

Resultados de la evaluación

Las evidencias presentadas con respecto a los estudios en humanos muestran una asociación positiva en el uso excesivo del celular y el desarrollo de tumores en la cabeza. Este resultado ha sido puesto en duda ya que en los estudios se identificaron varios sesgos de información y de selección, y además porque los estudios en animales e *in vitro* no arrojaron resultados que confirmen la asociación. De esta manera la monografía concluye que existe una “Limitada evidencia de carcinogenicidad en humanos” y una “Limitada evidencia de carcinogenicidad en animales”, y lo clasifica dentro del Grupo 2B como “Posible cancerígeno en humanos”.

IV.4 COMENTARIOS FINALES

El efecto cancerígeno de una exposición moderada a la radiofrecuencia no pudo ser totalmente negada debido a la identificación de sesgos de selección e información, pero el efecto por una exposición excesiva no pudo ser confirmada por los estudios en animales u otros experimentos. De esta manera la IARC concluye que hay una probabilidad muy baja de que la exposición a la radiofrecuencia esté asociada al cáncer, pero tampoco la descarta, y esto

podría ser una razón para alarmarse; sin embargo, revisando monografías de otros agentes encontramos que en este mismo grupo están el extracto de la hoja de Aloe vera y los alimentos curtidos, y para nada que hemos suspendido el uso de estos productos, de hecho los consumimos con toda confianza También en este grupo están la exposición a la gasolina, entre otros agentes que utilizamos en lo cotidiano pero que sus nombres son menos conocidos.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

La idea de realizar esta investigación surgió por una pregunta que nos hicimos: ¿la radiación del celular nos afecta en la salud? La misma estructura de la pregunta exige una respuesta simple: si, no, tal vez, en ocasiones, ... pero la justificación a esta respuesta no puede ser así de simple, ya que debe estar avalada por la investigación de expertos de varias disciplinas, de tal manera que, en caso de ser necesario, la respuesta se pueda enfrentar a poderosos intereses tecnológicos y económicos. Este enfrentamiento solo puede ser logrado con el respaldo de organizaciones con poder político pero cuyo principal interés sea el bienestar común, de hecho, también se requiere del respaldo económico para financiar las investigaciones. Por esta razón recurrimos como principal fuente a las publicaciones de organismos relacionados con la OMS, la cual desde mediados de la década de los 90's empezó a preocuparse por este tema, dada la creciente exposición y preocupación de los usuarios de telefonía celular.

Siendo el cáncer uno de los padecimientos que más preocupan a los organismos de salud, la mayor parte de las investigaciones se enfocaron hacia estas enfermedades. En este sentido la IARC es una agencia de la OMS especializada en identificar sustancias y agentes cancerígenos como primer paso hacia la prevención. Cuando se identifica un posible cancerígeno la IARC realiza una investigación exhaustiva cuyos resultados se publican en una monografía, cuyo fin último es clasificar el agente en una de las cuatro categorías: cancerígeno, posible cancerígeno, posible no-cancerígeno, no-cancerígeno².

En la determinación de la clasificación del agente la IARC investiga tres tipos de evidencia: estudios en humanos, estudios en animales y estudios de los mecanismos cancerígenos. La bioética prohíbe realizar experimentos en humanos, y en su lugar se hacen estudios epidemiológicos, de ellos el estudio Interphone es el estudio más importante que se ha hecho, el cual básicamente consistió en realizar cuestionarios y entrevistas a personas que padecen

² No son estos los nombres de las categorías IARC, pero nos parecen más descriptivos que los originales.

algún tipo de tumor en la cabeza y personas sanas, para identificar sus patrones de uso y tratar de encontrar una asociación entre el padecimiento y la exposición al agente. El estudio Interphone encontró que no existe una asociación causal entre el desarrollo de tumores en la cabeza y el uso moderado del celular; sin embargo, encontró que la asociación sí existe para un uso excesivo.

En los experimentos realizados en animales no se encontró ninguna asociación entre la exposición a la radiofrecuencia el desarrollo de tumores, y los estudios *in vitro* tampoco pudieron identificar mecanismos de interacción fisiológica que debido a la exposición a la radiofrecuencia propicien o favorezcan el desarrollo de tumores. De esta manera estos dos tipos de evidencia no respaldan el resultado obtenido por los estudios epidemiológicos, y dado que los estudios epidemiológicos por su misma naturaleza tienen sesgos de muestreo y de cierta manera confían en la subjetividad de la memoria de las personas, se concluye que la asociación encontrada puede deberse a estos sesgos y no a una verdadera relación causal. La conclusión final del IARC es que el uso del celular posiblemente no sea cancerígeno en humanos. La IARC hace hincapié que esta etiqueta podría cambiar en el futuro que se reúna más evidencia que permitan clasificarlo como cancerígeno o descartarlo totalmente, siendo esto último lo más probable.

Es muy importante mencionar que tanto los experimentos en animales como en los estudios de los mecanismos de interacción se consideró que la exposición a la radiofrecuencia estaba restringida a ciertos niveles de energía, estos niveles son impuestos por los estándares de emisión, y para esta investigación es muy importante averiguar quiénes elaboran estos estándares y la manera en que son determinados.

La ITU (*International Telecommunications Union*) es el organismo encargado de regular las telecomunicaciones a nivel internacional. Muchas de estas regulaciones se basan en recomendaciones de organizaciones internacionales como la IEEE, instituciones nacionales como la FCC de Estados Unidos y consorcios de empresas como la Alianza Wi-Fi. Esto debe ser así porque la tecnología suele ir adelante de la regulación, pues de otra manera la regulación frenaría el desarrollo tecnológico. La regulación es necesaria en primer lugar, por razones de

compatibilidad y, en segundo lugar, por cuestiones ecológicas y en algunos casos por cuestiones de salud, siento este último el aspecto que aquí nos atañe. Las dos recomendaciones que abordamos, recomendaciones ICNIRP y recomendaciones IEEE C95.1, difieren en detalles muy leves, y ambas están basadas en evidencia científica que afirma que el principal efecto de la exposición a la radiofrecuencia es el calentamiento de los tejidos. Por este motivo las recomendaciones están orientadas a limitar la potencia de las transmisiones a fin de no permitir que la radiofrecuencia incremente la temperatura de los tejidos a niveles que pueden provocar malfuncionamiento de los órganos. En los tejidos de la cabeza el incremento de temperatura permitido se limita a 2 °C, el cual corresponde con un SAR promedio de 20 W kg⁻¹. Luego este valor de SAR es reducido a 2 W kg⁻¹ para considerar la variabilidad biológica de los individuos y otros factores de incertidumbre.

Después de estudiar las recomendaciones revisamos las especificaciones de algunos de los teléfonos celulares modernos y efectivamente vimos que antes de permitir la venta de un equipo celular se verifica que por ninguna razón las emisiones superen un SAR promedio de 2 W kg⁻¹. De hecho, según las especificaciones de todos los equipos revisados, el SAR pico de los dispositivos celulares es siempre menor a este valor.

Vemos aquí que las instituciones de salud y las regulatorias de telecomunicaciones tienen el propósito conjunto de salvaguardar la salud de los individuos y al mismo tiempo no entorpecer la incorporación de las tecnologías que nos faciliten la vida. Sin embargo, podemos plantearnos algunas objeciones. La más importante que se nos ocurre es que para imponer los límites las recomendaciones solo se consideraron los efectos térmicos por ser los más significativos, pero podría haber efectos como la electroestimulación y otros no conocidos que no fueron tomados en cuenta. Esta objeción puede ser de cierta manera refutada por los estudios de la IARC, en donde de haber algún otro efecto importante hubiera salido a flote en los estudios epidemiológicos y en los experimentos realizados en animales e in vitro.

Una objeción que aparece mucho en algunas páginas de la Internet está basada en las teorías de la conspiración (RF Safe, s.f.). En este tipo de páginas hacen alusión al caso del cigarro,

donde supuestamente las compañías tabacaleras por mucho tiempo pagaron a las instituciones de salud pública para que no revelaran los daños que produce el consumo del cigarro. Y entonces especulan que los fabricantes de celulares están haciendo algo similar. Revisamos estas páginas y en ninguna encontramos que hubiera algún responsable por la información que publican, o alguna referencia a una investigación científica que respalde sus afirmaciones. Además, notamos que en la mayoría de estas páginas se incluía la promoción un producto que te “protege” de los daños de la radiación por radiofrecuencia, lo cual pone en duda el supuesto servicio social que están realizando al desenmascarar estas conspiraciones.

Las comunicaciones por radiofrecuencia siguen avanzando muy rápido, actualmente se están desarrollando e instalando las primeras redes 5G en los países del primer mundo. Para estas redes se están considerando transmisiones a frecuencias de varios giga hertz. Ya se sabe que a esas frecuencias la radiación penetra muy poco los tejidos, y de nuevo el efecto más importante es calentamiento, pero en este caso únicamente de la piel. Suponemos que en un futuro será necesario realizar estudios epidemiológicos, en animales e *in vitro* para verificar si aparecen nuevos efectos y en caso de ser necesario modificar los límites de emisión. Sin embargo, consideramos que es muy poco probable que se encuentre algún nuevo efecto de las radiaciones de alta frecuencia de la 5G, ya que el planteamiento de la 5G es la reducción del área de cobertura de las células y por lo tanto la reducción de la potencia de transmisión.

Una tecnología que se está desplegando actualmente son los servicios de acceso a la Internet mediante redes satelitales de órbita baja, siendo el sistema Starlink el más conocido, pero no el único. Hasta donde se sabe para conectarse a esta red se requiere una antena y un modem especial, pero se especula que en el futuro se podría acceder al sistema satelital directamente desde el teléfono celular, lo cual nos causa duda acerca de su implementación, sobre todo porque la distancia del móvil al satélite supera por mucho la distancia a una estación base en tierra, y para llegar desde el celular al satélite se requerirá incrementar la potencia de transmisión y el tamaño de las antenas. Habrá que esperar a que se implementen estos sistemas para ver cómo se resuelve el problema de la potencia y de cómo la solución garantiza que la salud de los usuarios no se vea afectada.

REFERENCIAS

- Cardis, E., Richardson, L., Deltour, I., Armstrong, B., Feychting, M., Johansen, C., . . . McKinney, P. (2007). The INTERPHONE study: design, epidemiological methods, and description of the study population. *European Journal of Epidemiology*, 22, 647-664.
- Ewa, K., & Andrzej, K. (2019). 5G Technology as the Successive Stage in the History of Wireless Telecommunication. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)* (págs. 470-473). Kremenchuk, Ukraine: IEEE. doi: 10.1109/MEES.2019.8896516
- FCC Consumer and Governmental Affairs Bureau. (8 de sept de 2017). *SAR para Teléfonos Celulares: Lo que Significa para Usted*. Obtenido de <https://www.fcc.gov/consumers/guides/sar-para-telefonos-celulares-lo-que-significa-para-usted>
- Gu, G., & Peng, G. (2010). The survey of GSM wireless communication system. *International Conference on Computer and Information Application*. Tianjin, China: IEEE. doi:10.1109/ICCIA.2010.6141552
- Hardell, L., Carlberg, M., & Hansson Mild, K. (2011). Pooled analysis of case-control studies on malignant brain tumours and the use of mobile and cordless phones including living and deceased subjects. *International Journal of Oncology*, 38, 1465-1474. doi:<https://doi.org/10.3892/ijo.2011.947>
- IARC. (2012). *The INTERPHONE study*. Recuperado el 2020, de <http://interphone.iarc.fr/>
- IARC. (3 de Marzo de 2020). *IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans*. Obtenido de <https://monographs.iarc.fr/list-of-classifications>
- IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. (2013). *Non-ionizing radiation, Part 2: Radiofrequency electromagnetic fields* (Vol. 102). Lyon, Francia: IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans.
- ICNIRP. (2020). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys*, 118(5), 483-524.

- IEEE standard C95.1. (2019). *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- IFT. (26 de Febrero de 2020). *Página principal de Comunicación y Medios*. Obtenido de <https://www.ift.org.mx/comunicacion-y-medios/comunicados-ift/es/el-ift-publicados-disposiciones-tecnicas-sobre-limites-de-exposicion-maxima-radiaciones>
- INTERPHONE Study Group. (2010). Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study. *International Journal of Epidemiology*, 39, 675-694.
- INTERPHONE Study Group. (2011). Acoustic neuroma risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study. *The International Journal of Cancer Epidemiology, Detection and Prevention*, 35, 453-464.
- Islam, N., & Want, R. (2014). Smartphones: Past, Present, and Future. *IEEE Pervasive Computing*, 13(4), 89-92.
- ITU-R. (2015). Manual sobre la gestión nacional del espectro. Ginebra, Suiza.
- Mobile & Wireless Forum. (s.f.). *SAR tick*. Recuperado el 2022, de <http://www.sartick.com/sar-basics.cfm>
- National Cancer Institute. (enero de 2019). *Cell Phones and Cancer Risk*. Obtenido de <http://www.cancer.gov/about-cancer/causes-prevention/risk/radiation/cell-phones-fact-sheet>
- Organización Mundial de la Salud. (7 de diciembre de 2018). *The International EMF Project*. Obtenido de http://www.who.int/peh-emf/project/EMF_Project/en/
- Rappaport, T. S. (2002). *Wireless communications: principles and practice* (segunda ed.). Upper Saddle River, N.J., USA.: Prentice Hall.
- Resnick, R., Halliday, D., & Krane, K. (2002). *Física* (Vol. 2). México, D.F.: CECSA.
- RF Safe. (s.f.). *RF Safe*. Obtenido de <https://www.rfsafe.com/>
- Samet, J., Chiu, W., Coglianò, V., Jinot, J., Kriebel, D., Lunn, R., . . . Fritschi, L. (Enero de 2020). The IARC Monographs: Updated Procedures for Modern and Transparent Evidence Synthesis in Cancer Hazard Identification. (O. Academic, Ed.) *Journal of the National Cancer Institute*, 112(1), 30-37.

- Silverthorn , D. (2008). *Fisiología humana : un enfoque integrado*. Buenos Aires: Médica Panamericana.
- Uribe Valencia, Y. (2012). Telefonía celular y el cáncer, un debate científico-tecnológico-público. *ArtefaCToS. Revista de estudios sobre la ciencia y la tecnología*, 5(1), 151-184. Obtenido de <http://revistas.usal.es/index.php/artefactos/article/view/12427>
- Villa, A., Moreno, L., & García, G. (2012). *Epidemiología y estadística en salud pública*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Wolfgang, B., & Westfall, G. (2014). *Física para ingeniería y ciencias* (2da ed., Vol. 1). México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana.
- World Health Organization. (2006). *Marco para el desarrollo de estándares de CEM basados en la salud*.
- Young, H., & Freedman, R. (2013). *Física universitaria con física moderna* (13 ed., Vol. 2). Naucalpan, México: Pearson.