

Campos electromagnéticos de muy bajas frecuencias

Retos de la gestión en ciudades hiperurbanizadas

GUSTAVO ANDRÉS RAMOS LÓPEZ | RODOLFO GARCÍA SIERRA | DAVID STEVEN PÉREZ
ATEHORTÚA | LUIS JORGE HERNÁNDEZ FLÓREZ | DANIELA RODRÍGUEZ SÁNCHEZ |
NÉSTOR MISAELO PEÑA TRASLAVIÑA | FELIPE FORERO RODRÍGUEZ



Universidad de
los Andes
Colombia

Facultad
de Ingeniería

Campos electromagnéticos de muy bajas frecuencias

Campos electromagnéticos de muy bajas frecuencias

Retos de la gestión en ciudades hiperurbanizadas

Gustavo Andrés Ramos López

Rodolfo García Sierra

David Steven Pérez Atehortúa

Luis Jorge Hernández Flórez

Daniela Rodríguez Sánchez

Néstor Misael Peña Traslaviña

Felipe Forero Rodríguez

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Nombres: Ramos López, Gustavo Andrés, autor. | García Sierra, Rodolfo, autor. | Pérez Atehortúa, David Steven, autor. | Hernández Flórez, Luis Jorge, autor. | Rodríguez Sánchez, Daniela, autor. | Peña Traslaviña, Néstor Misael, autor. | Forero Rodríguez, Felipe, autor.

Título: Campos electromagnéticos de muy bajas frecuencias: retos de la gestión en ciudades hiperurbanizadas / Gustavo Andrés Ramos López, Rodolfo García Sierra, David Steven Pérez Atehortúa, Luis Jorge Hernández Flórez, Daniela Rodríguez Sánchez, Néstor Misael Peña Traslaviña, Felipe Forero Rodríguez.

Descripción: Bogotá: Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Ediciones Uniandes, 2025. | xv, 78 páginas: ilustraciones; 17 x 23.5 cm.

Identificadores: ISBN 978-958-798-928-1 (rústica) | 978-958-798-929-8 (e-book) | 978-958-798-930-4 (e-pub)

Materias: Electrificación | Campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja

Clasificación: CDD 621.31–dc23

SBUA

Primera edición: noviembre del 2025

© Gustavo Andrés Ramos López, Rodolfo García Sierra, David Steven Pérez Atehortúa, Luis Jorge Hernández Flórez, Daniela Rodríguez Sánchez, Néstor Misael Peña Traslaviña, Felipe Forero Rodríguez

© Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería,
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Ediciones Uniandes

Carrera 1.º n.º 18A-12, bloque Tm
Bogotá, D. C., Colombia
Teléfono: 601 339 4949, ext. 2133
<http://ediciones.uniandes.edu.co>
ediciones@uniandes.edu.co

ISBN: 978-958-798-928-1

ISBN e-book: 978-958-798-929-8

ISBN epub: 978-958-798-930-4

DOI: [//dx.doi.org/10.51573/Andes.9789587989281.9789587989298.9789587989304](https://dx.doi.org/10.51573/Andes.9789587989281.9789587989298.9789587989304)

Corrección de estilo: Yecid Muñoz

Diagramación: Precolombi EU, David Reyes

Imagen de cubierta: generada mediante Chatgpt-Dall E, 2025.

Impresión:

Panamericana Formas e Impresos S. A.

Calle 65 n.º 95-28

Teléfono: 601 430 2110

Bogotá, D. C., Colombia

Impreso en Colombia – *Printed in Colombia*

Universidad de los Andes | Vigilada Mineducación. Reconocimiento como universidad: Decreto 1297 del 30 de mayo de 1964. Reconocimiento de personería jurídica: Resolución 28 del 23 de febrero de 1949, Minjusticia. Acreditación institucional de alta calidad, 10 años: Resolución 000194 del 16 de enero del 2025, Mineducación.

Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida ni en su todo ni en sus partes, ni registrada en o transmitida por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, electro-óptico, por fotocopia o cualquier otro, sin el permiso previo por escrito de la editorial

Contenido

Lista de recursos gráficos	xI
Introducción	xIII
Capítulo 1. La electrificación en ciudades hiperurbanizadas	1
1.1. La electrificación de la movilidad urbana	4
1.2. La electrificación de la renovación urbana	6
1.3. La electrificación de la digitalización urbana	7
1.4. Retos de la electrificación	7
Capítulo 2. Escudriñar las frecuencias extremadamente bajas	11
2.1. Un viaje inicial hacia los campos de baja frecuencia	12
2.2. Explorar los campos electromagnéticos naturales de baja frecuencia	16
2.2.1. La danza cósmica: la influencia geomagnética y solar en las frecuencias extremadamente bajas	17
2.2.2. Tormentas y centelleos: frecuencias extremadamente bajas en las descargas atmosféricas	18
2.2.3. Fauna silvestre: una perspectiva diferente	20

2.3. Tejer el paisaje urbano: campo electromagnético en el epicentro residencial	23
2.3.1. Breve historia de la infraestructura eléctrica	25
2.3.2. Cambios en los niveles de exposición a campos de frecuencias extremadamente bajas debido a la evolución tecnológica	26
2.3.3. Implicaciones futuras y tendencias en la infraestructura eléctrica	27
2.4. En el corazón del hogar: campos electromagnéticos y electrodomésticos	29
2.4.1. Dispositivos que emiten campos en frecuencias extremadamente bajas	29
2.4.2. Dispositivos que no emiten campos en frecuencias extremadamente bajas	29
2.4.3. Normativas y medidas de seguridad	30
2.4.4. Importancia de la conciencia y las buenas prácticas	31

Capítulo 3. Frecuencias extremadamente bajas en el panorama mundial

3.1. Estudios y hallazgos relevantes en diferentes regiones del mundo	33
3.1.1. Roles y responsabilidades	34
3.1.2. Colaboraciones internacionales	37
3.1.3. Financiamiento de investigaciones	38
3.1.4. Plataformas de información y transparencia	39
3.1.5. Educación y concienciación pública	40
3.1.6. Impacto en la percepción pública	41
3.1.7. Campañas de sensibilización	42
3.2. Normatividad y regulación	43
3.2.1. Normativas internacionales	44
3.2.2. Regulaciones nacionales	45
3.2.3. Cumplimiento y supervisión	47

Capítulo 4. Frecuencias extremadamente bajas y salud: un enfoque integral

4.1. Las frecuencias extremadamente bajas y la salud	51
4.2. Efectos en la salud	52

4.2.1. Efectos directos	53
4.2.2. Efectos indirectos	53
4.3. Normatividad	54
4.4. Vigilancia de aire, ruido y radiación electromagnética	55
4.4.1. Componente ambiental	56
4.4.2. Componente de salud	56
4.5. Vigilancia en salud ambiental de los posibles efectos por exposición a radiación electromagnética	57
4.6. Percepción de síntomas no específicos por radiación electromagnética	57
4.6.1. Fuentes de información: Observatorio de Salud de Bogotá	58
4.6.2. Fuentes de información: Subdirección de Vigilancia en Salud Pública	59
4.6.3. Reporte en el sistema de salud según patologías asociadas	60
4.7. Experiencias internacionales	60
4.8. Recomendaciones	62
4.8.1. Participación de la comunidad en la toma de decisiones relativas a la colocación de antenas de radiodifusión y líneas de transmisión eléctrica	62
4.8.2. Percepción del riesgo	63
4.8.3. Ejemplos de política pública implementados en Bogotá	65
Capítulo 5. Oportunidades y desafíos en la gestión de campos de frecuencias extremadamente bajas en ciudades hiperurbanizadas	67
5.1. Desafíos en la gestión de los campos de frecuencias extremadamente bajas	68
5.2. Políticas, regulaciones y cooperación internacional en la gestión de frecuencias extremadamente bajas	70
Referencias	73

Lista de recursos gráficos

Diagramas

Diagrama 1. Clasificación de los tipos de radiación	13
Diagrama 2. Composición del campo electromagnético	15
Diagrama 3. Colaboración entre agentes clave para la gestión de los campos en frecuencias extremadamente bajas	39

Figuras

Figura 1. Horizontes urbanos	2
Figura 2. Representación de las ciudades con mayor tráfico en Latinoamérica	5
Figura 3. Interacción de campos electromagnéticos: átomos, electrones y tecnología	12
Figura 4. Danza cósmica	17
Figura 5. Representación gráfica de descarga atmosférica	19
Figura 6. Interconexión entre la vida salvaje y la tecnología	20
Figura 7. Frecuencias extremadamente bajas en diferentes regiones del mundo	34
Figura 8. Enfoque integral con respecto a las frecuencias extremadamente bajas y la salud	52

Figura 9. Política pública y oportunidades en ciudades
hiperpobladas

68

Tablas

Tabla 1. Enfoque integral con respecto a las frecuencias
extremadamente bajas y la salud 60

Introducción

Campos electromagnéticos de muy bajas frecuencias. Retos de la gestión en ciudades hiperurbanizadas es una recopilación del estado del tema que explora en profundidad la intersección entre la electrificación masiva en ciudades densamente pobladas y la presencia de campos electromagnéticos de frecuencias extremadamente bajas (ELF). Estos campos, generados principalmente por la infraestructura eléctrica, son un fenómeno cada vez más relevante en el contexto de la urbanización acelerada y la transición energética hacia fuentes de energía renovables, tales como la solar y la eólica. En este contexto, el contenido de este libro se distingue por ir más allá de la descripción exclusivamente técnica de los campos ELF, abarcando sus implicaciones sociales, ambientales y de salud, dentro de un marco de electrificación urbana sostenible. La electrificación de las ciudades no solo está transformando la movilidad urbana —como se observa en la adopción de flotas de buses eléctricos, además de bicicletas y patinetas eléctricas—, sino que también está impulsando la renovación de infraestructuras residenciales y la digitalización de servicios, lo que lleva a la creación de edificios totalmente eléctricos y la implementación de tecnologías avanzadas como la 5G y la inteligencia artificial. Estas transformaciones, sin embargo, no están exentas de desafíos, especialmente en términos de la exposición continua a los campos ELF, que, aunque son de baja frecuencia y no ionizantes, han generado preocupación por sus posibles efectos en la salud humana y el

medio ambiente. El análisis profundiza en los riesgos asociados a esta exposición, destacando la importancia de gestionar eficientemente tales desafíos, un aspecto que, aunque se ha tocado en la literatura existente, merece mayor atención y desarrollo. El libro hace un recorrido por la historia y evolución de la infraestructura eléctrica, desde los primeros días de la electrificación —con la invención de la luz eléctrica y la adopción de la corriente alterna— hasta la integración actual de redes inteligentes y fuentes de energía renovables. A lo largo de este recorrido, se observa cómo los niveles de exposición a campos ELF han aumentado, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas. Se subraya la importancia de monitorear y gestionar esta exposición, particularmente en los entornos residenciales donde la proximidad a subestaciones, transformadores y líneas de transmisión eléctrica puede elevar los niveles de radiación electromagnética a los que están sometidos los habitantes. Además, se contemplan las posibles afectaciones de los campos ELF sobre la fauna silvestre, tales como la alteración del comportamiento y la salud de diversas especies animales, advirtiendo que la investigación en este ámbito necesita un mayor desarrollo. Este enfoque integral, que considera tanto a las personas como a la fauna, añade un valor distintivo al presente volumen, al abordar una dimensión amplia y relevante de los campos ELF, lo que permite una comprensión más completa de sus efectos y revela la necesidad de contar con estrategias de gestión que protejan tanto a las personas como a los ecosistemas.

A nivel global, se presenta un panorama de cómo diferentes regiones —América del Norte, Europa y Asia— están abordando la regulación y gestión de los campos ELF. En América del Norte, empresas como Southern California Edison e Hydro-Quebec lideran investigaciones y programas educativos para aumentar la conciencia pública, mientras que en Europa entidades como la Red Eléctrica de España y RTE en Francia implementan medidas de monitoreo y colaboran en proyectos de investigación internacionales para garantizar que sus infraestructuras eléctricas operen dentro de los límites seguros establecidos por normativas como las de la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP). En Asia, la institución Japan EMF Information Center desempeña un papel crucial en la educación y difusión de información sobre los posibles efectos de los campos ELF. El análisis comparativo de las normativas internacionales no solo ofrece una visión panorámica, sino que contextualiza las diversas estrategias de regulación y gestión dentro de un enfoque más amplio e interconectado. El documento también destaca la relevancia de las normativas internacionales y nacionales que regulan la exposición

a los campos ELF, con especial énfasis en las directrices de la ICNIRP, adoptadas por numerosos países. Estas normativas son fundamentales para proteger la salud pública, ya que establecen límites seguros para la exposición tanto en entornos ocupacionales como públicos en general. Sin embargo, se señala que la eficacia de estas regulaciones depende de la transparencia y la accesibilidad de la información, lo que requiere un esfuerzo continuo por parte de empresas y organismos reguladores para educar al público y fomentar la participación comunitaria en la toma de decisiones sobre la ubicación de infraestructuras eléctricas. A lo largo del texto, se insiste en la importancia de una gestión proactiva de la sensibilización pública, en busca de reducir la desinformación y aumentar la confianza en las instituciones encargadas de la regulación. Finalmente, se concluye que la electrificación sostenible de las ciudades hiperurbanizadas es un proceso complejo que requiere un enfoque integrado y multidisciplinario, que no solo considere los beneficios tecnológicos y ambientales de la transición a energías limpias, sino que también aborde los posibles riesgos para la salud y el bienestar de la población. El enfoque integrado del texto presenta un análisis completo de los aspectos técnicos, políticos y sociales involucrados, de modo que proporciona un marco holístico para comprender los desafíos futuros de la electrificación urbana. Esto implica, además del desarrollo de infraestructuras eléctricas avanzadas y eficientes, la implementación de políticas públicas que promuevan la seguridad y la sostenibilidad a largo plazo, fomentando la investigación continua sobre los efectos de los campos ELF y adoptando medidas preventivas para minimizar su impacto en los entornos urbano y natural.

Capítulo 1. La electrificación en ciudades hiperurbanizadas



FIGURA 1. Horizontes urbanos

Fuente: generada mediante ChatGPT-Dall E, 2024.

La urbanización es un proceso relevante desde inicios del siglo pasado, cuando la mitad de toda la población de América del Norte ya vivía en ciudades. Este proceso se ha venido expandiendo hasta convertirse en una realidad global, pues la mitad de toda la población mundial vive en ciudades (2020). De esta forma, la urbanización representa el movimiento migratorio humano más relevante en los últimos dos siglos, y ha ido generando un conjunto de cambios, en muchos casos abrumadores, por los retos que implica el reacomodo y recreación de los espacios urbanos para su adaptación a las nuevas expectativas

de antiguos y nuevos residentes. Tales cambios son el resultado de estos procesos y tendencias emergentes, como la electrificación proveniente de fuentes renovables. Un fenómeno reciente, y subyacente a esta macrotendencia mundial es la densificación extrema, que ha conducido a la formación de megaciudades principalmente en países emergentes como China, los cuales —aunque inician una estrategia de urbanización tardía— han impulsado una adopción feroz de las megápolis como solución transversal de desarrollo económico, llevando sus ciudades a las dimensiones, desconocidas en el siglo pasado, de las megaciudades¹ actuales² y, con ambiciones superiores, las nuevas *gigaciudades*³. Aproximadamente el 50 % de la población urbana mundial vive en ciudades pequeñas, con menos de 500 000 habitantes, mientras que cerca del 13 % reside en 33 megaciudades con más de diez millones de habitantes. Hace unas décadas, las principales áreas urbanas se encontraban mayoritariamente en regiones desarrolladas, pero en la actualidad las grandes ciudades están predominantemente localizadas en el hemisferio sur [1].

Al mismo tiempo que avanza la hiperurbanización, la electrificación se convierte en el principal símbolo de transición energética mundial, pasando de combustibles fósiles contaminantes a energía eléctrica limpia proveniente principalmente de recursos energéticos renovables como la geotermia o la energía solar y la eólica, disponibles incluso en los espacios urbanizados. El uso de la electricidad se acelera porque los nuevos dispositivos de consumo se diseñan para operar con energía eléctrica, siendo el ejemplo más común las tecnologías de telecomunicaciones y entretenimiento de la era actual. Una de las razones para estimular tal uso en las ciudades proviene de su capacidad para transmitir grandes cantidades de energía con exigencias físicas de infraestructura relativamente menores en términos de conexión con los centros de generación eléctrica. Asimismo, el consumo urbano se beneficia de los nuevos desarrollos en el manejo eficiente de los recursos energéticos. Se logra así un ascenso tecnológico crucial para la incorporación de grandes avances en electrónica de semiconductores, comunicaciones de quinta generación (5G),

1 Naciones Unidas define *megaciudad* como aquella con más de diez millones de personas, incluyendo áreas metropolitanas adscritas.

2 En la pospandemia (2024) ya existen más de 85 megaciudades en el mundo. Se espera que antes de mitad de siglo (2050) existan más de doscientas.

3 Jing-Jin-Ji (Beijing-Tianjin-Hebei), también llamada “Ciudad Infinita”, sería la primera gigaciudad de más de cien millones de habitantes en el mundo.

masificación de la computación en la nube y adopción de algoritmos de inteligencia artificial en todas las áreas de trabajo, lo que dota a la sociedad de nuevas capacidades productivas.

A continuación, se muestran ejemplos concretos de cómo la creciente electrificación aporta a la resolución de desafíos recurrentes en las sociedades altamente urbanizadas, como la movilidad, la renovación y la digitalización urbana.

1.1. La electrificación de la movilidad urbana

Bogotá, con su recién formada área metropolitana en el 2023^[4], se perfila como una megaciudad relevante a nivel latinoamericano e hiperurbanizada respecto a la densidad demográfica promedio mundial. Ello ha suscitado mayores presiones en materia de movilidad de pasajeros y de carga a nivel metropolitano, pues la ciudad es considerada como una de las más congestionadas en Latinoamérica y a nivel mundial [2]. Al revisar los indicadores para la región, se puede observar que Colombia, Brasil y Ecuador son tres de los países con mayor índice de congestión, como se resalta en la figura 2.

Así pues, ha surgido un debate sobre las estrategias necesarias para abordar este desafío. Por ello, la transición hacia un transporte sostenible se ha convertido en un eje central del Plan de Desarrollo de la Alcaldía Mayor de Bogotá, cuyo objetivo es garantizar a la población un servicio de transporte de calidad, ambientalmente responsable y equitativo [3]. En ese sentido, la ciudad ha venido adoptando planes de movilidad intensivos en inversión, como la construcción del metro de la ciudad y la incorporación de 1485 buses eléctricos [4], lo que ubicó a Bogotá, en el 2023, como la segunda ciudad fuera de China con mayor flota eléctrica a nivel mundial.

La ciudad es modelo de electrificación masiva acelerada y su innovación en los mecanismos de financiación es ejemplo para todo el país porque la eficiencia de la flota eléctrica permite mejorar sustancialmente los costos de operación y mantenimiento (Opex). En efecto, al considerarse períodos mayores a diez años, se observa la recuperación total de la inversión por diferenciales en la

⁴ El Consejo Regional inicia funciones luego de que la Asamblea Departamental de Cundinamarca, mediante Ordenanza 85 del 2022, y el Concejo de Bogotá, por medio del Acuerdo 858 del 2022, autorizaron, respectivamente, el ingreso del Departamento de Cundinamarca y el Distrito Capital a la Región Metropolitana Bogotá-Cundinamarca.



FIGURA 2. Representación de las ciudades con mayor tráfico en Latinoamérica

Fuente: generada mediante ChatGPT-Dall E, 2024.

operación tales como la ausencia de consumo de energía cuando los buses están detenidos en un habitual trancón de la capital del país —situación distinta a la de un bus tradicional de combustión (diésel)—.

Por otro lado, las 1500 bicicletas eléctricas del sistema público de la ciudad, las más de 20 000 patinetas o los cables aéreos en construcción son demostraciones de la receptividad de la electrificación del transporte por parte de los ciudadanos y su creciente impacto en mejoras ambientales (calidad del aire, ruido) y salud (enfermedades respiratorias).

1.2. La electrificación de la renovación urbana

En las ciudades, la construcción de vivienda de interés social (vis) es un elemento central de las políticas públicas habituales para lograr la inclusión de la mayor cantidad de ciudadanos en los beneficios de la consolidación de zonas con alta cobertura de servicios públicos y facilidades de conexión con espacios de trabajo, ocio o complementarios, como salud y educación. Las dimensiones de estas soluciones habitacionales han ido reduciendo su tamaño como respuesta a las presiones inflacionarias sobre bienes escasos como los terrenos para su construcción y la habilitación urbana integral circundante. Entre las medidas de mitigación disponibles se encuentra la adopción de edificios totalmente eléctricos, en los cuales se sustituye completamente el uso de gasodomésticos por su equivalente electrodoméstico, de manera que las redes de gas natural, con mayores exigencias de ventilación y espacio, son reemplazadas por soluciones acordes a las realidades de compactación de los proyectos de construcción vis. En este tipo de medidas se ha ido más allá de su aplicación voluntaria, hasta llegar a restricciones normativas, como sucede en Nueva York [5], donde se aprobaron leyes en los años pospandemia (2023) para prohibir la construcción de edificios con gas natural desde el 2030 y estimular el uso de estufas vitro-cerámicas, calentadores solares y cargadores para vehículos eléctricos, como parte del esfuerzo de renovación urbana sostenible de la ciudad.

Si, además, la renovación urbana logra integrar soluciones de gestión energética a nivel de las nuevas edificaciones, el efecto acumulado puede implicar reducciones significativas y permanentes de intensidad energética, apalancadas en los avances en inteligencia artificial, almacenamiento de energía renovable, domótica e internet de las cosas. En este contexto, iniciativas regulatorias como el Sello Ambiental Colombiano (sac) refuerzan este enfoque, ya que, mediante normas desarrolladas por Minambiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) y el organismo de certificación, se busca garantizar que los procesos y productos empleados en la construcción de edificaciones sostenibles minimicen su impacto ambiental. Estos instrumentos proporcionan información verificable y precisa, que fomenta tanto el mejoramiento ambiental de los procesos productivos como la adopción de bienes y servicios sostenibles por parte de los consumidores [6].

1.3. La electrificación de la digitalización urbana

La electrificación es un habilitador de la era de la inteligencia artificial, y la industria asociada a esta nueva tecnología se compone principalmente de centros de datos cuya localización y consolidación depende crucialmente del acceso eficiente a energía eléctrica. En la actualidad, las ciudades más electrificadas e interconectadas al internet son aquellas con mejores perspectivas de crecimiento económico; de hecho, uno de los principales generadores de nuevos empleos de la era pospandemia es el sector de los centros de atención de llamadas (*call centers*), los cuales continúan su migración de la atención masiva a la personalización, lo que a su vez implica algoritmos más complejos e intensivos en el consumo de energía eléctrica. La digitalización, con los avances de la computación verde, será un vector de crecimiento de demanda eléctrica, y las ciudades podrán responder a su favor brindando nuevas posibilidades de economía digital a sus ciudadanos. De otro lado, una industria en proceso de electrificación complementaria es el turismo urbano, pues las oportunidades de esparcimiento representan cada vez mayores necesidades eléctricas, como sucede con las nuevas atracciones en parques de diversiones en Bogotá [7].

1.4. Retos de la electrificación

Hay diversos retos que afrontar para acelerar la adopción de la electrificación más allá de los niveles actuales, los cuales, aunque crecientes, resultan insuficientes para lograr un impacto sostenible más acorde con las metas de los escenarios de cero emisiones netas comprometidas por varios países, entre ellos Colombia. Es pues necesario un aporte adicional del sector eléctrico para compensar los menores avances en sectores más significativos, como el agrícola, aún sin capacidad de actuar coordinadamente con la solidez con la que pueden hacerlo las empresas del sector eléctrico del país.

Inicialmente, tendríamos la competitividad industrial para usos caloríficos, ya que en la gran mayoría de países la energía eléctrica es más costosa que la de combustibles fósiles como el gas natural. De hecho, en Europa se ha mantenido constante en la última década (2010 al 2020) esta tendencia, que solo en el momento de grandes disruptpciones geopolíticas se ha invertido. En cuanto a Centroamérica y Sudamérica, una electrificación fuerte necesita

lograr una integración regional intensa aún esquiva en muchos países de la región, como sucede con el anhelado sueño, que se remonta al siglo pasado, de unir los sistemas de transmisión de electricidad de ambos subcontinentes⁵.

Otro asunto por resolver en la era de la electrificación proviene de comprender el riesgo emergente de un exitoso despliegue de los nuevos usos de la electricidad. En efecto, al operar una mayor cantidad de dispositivos con electricidad, su ausencia, independiente de la causa que la origine, implicaría una parálisis profunda en las sociedades, como demostraron los casos de los apagones en Ecuador, Estados Unidos [8] y Alemania, entre otros países, en los años pospandemia (2020). Una posible solución provendría de generar diversos modos de operación seguros con sus planes de contingencia reforzados ante su mayor impacto previsto en el futuro, considerando nuevas amenazas nacientes, como los ciberataques⁶, la transición demográfica⁷ y la vulnerabilidad de las infraestructuras eléctricas a los cambios climáticos extremos (resiliencia intrínseca).

Finalmente, el último y, según algunos, el mayor desafío proviene de los riesgos sanitarios que implica para la población la exposición a campos electromagnéticos de forma permanente y cada vez más cercana, dada la hipurbanización. Las redes de distribución de energía eléctrica con diseños desactualizados, de la época de la electrificación rural temprana, siguen en uso en las grandes ciudades y deben caducar su replicación progresivamente ante la necesidad de reconocer las nuevas situaciones de convivencia con exposición permanente de campos electromagnéticos como en aquellas vías con redes de media tensión a 14 m del suelo. En esta era de la electrificación, por ejemplo, elevar cometas por parte de los niños de ninguna manera podrá significar un riesgo para la seguridad. Por tal motivo, las redes aéreas deberán iniciar una transición hacia su aislamiento (trenzado), sobre todo ante la evidencia económica de la similitud en costos entre soluciones de redes aéreas con conductores desnudos energizados y redes aéreas aisladas y trenzadas: la eliminación de componentes como soportes, aisladores o descargadores de tensión compensa su ascenso tecnológico al evitar riesgos de seguridad para ciudadanos en parques o afectados por distancias de seguridad reducidas producto de la constante

5 Interconexión eléctrica entre Panamá y Colombia.

6 Virus Stuxnet.

7 Envejecimiento del talento humano en el sector eléctrico.

renovación y compactación urbana de las megaciudades actuales. Adicionalmente, los nuevos compromisos ambientales que fomentan la electrificación también implican asumir enfáticamente la protección de animales (fauna) y plantas (flora), y la forma más directa para dicha protección nuevamente pasa por la sustitución de las redes aéreas con cables desnudos energizados por redes trenzadas aéreas completamente aisladas. Son evidentes los beneficios de estas en términos de calidad de servicio, menores costos operativos al eliminar innecesarias rutinas de poda y tala, y resiliencia superior ante lluvias torrenciales. Además, al pasar de competir por el espacio con los árboles y las capas de vegetación urbana a simplemente convivir de forma armoniosa con dichas realidades, se elimina la mayoría de contactos fortuitos que comprometen tanto el servicio eléctrico como la vitalidad de los árboles y todas las formas de fauna asociadas a las ciudades, evitando la electrocución de gatos, aves y otros animales que hoy sigue sin ser registrada. Con iniciativas de renovación urbana todo ese entorno podría convertirse en aliado de la electrificación segura y decidida de las megaciudades, aportando así a la transición energética de las sociedades durante las próximas décadas.

Las redes eléctricas en las ciudades, ya que se diseñaron y pusieron en operación hace décadas, no pueden adaptarse a las crecientes restricciones de espacio propias de las ciudades altamente densificadas. Además, su envejecimiento, en casi todas las ciudades del mundo, con pocos esfuerzos por cambio tecnológico hacia su aislamiento eléctrico completo, las vuelve un riesgo creciente para la seguridad humana, de modo que es necesario establecer servidumbres a perpetuidad con la respectiva perdida de espacio disponible en superficie para otros usos vitales. Las experiencias internacionales abren la posibilidad de replantear los procesos de renovación urbana considerando la subterranización de redes como estrategia altamente efectiva en el logro de objetivos de calidad de servicio eléctrico a largo plazo. Además, se atenúa así la necesidad de mayores inversiones en obras civiles del espacio público, dado que es precisamente en los procesos de renovación urbana donde se crean las oportunidades de coordinación entre múltiples actores para implementar este tipo de redes como solución de largo plazo a riesgos tanto de contacto eléctrico como de aislamiento parcial de campos electromagnéticos. De esa manera, la exposición de los ciudadanos pasa de ser permanente (viviendas con personas durmiendo las noches enteras a distancias cortas respecto a redes electrificadas desnudas de media tensión) a ocasional (peatones transitando esporádicamente cerca de tales redes durante sus trayectos regulares).

Capítulo 2. Escudriñar las frecuencias extremadamente bajas

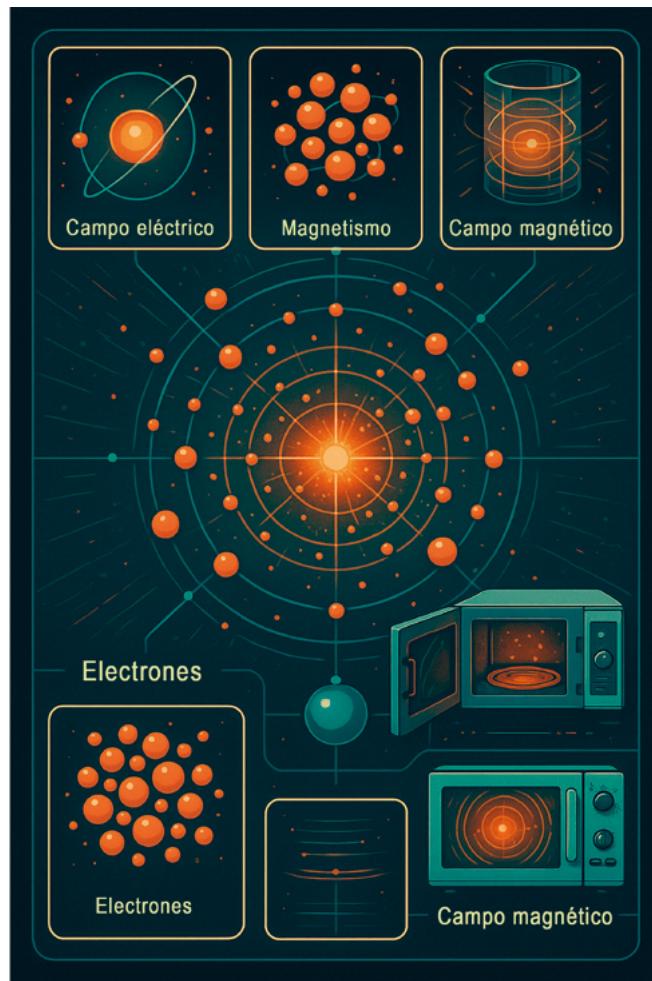


FIGURA 3. Interacción de campos electromagnéticos:
átomos, electrones y tecnología

Fuente: generada mediante ChatGPT-Dall E, 2024.

2.1. Un viaje inicial hacia los campos de baja frecuencia

La radiación es un fenómeno en el que se emiten y propagan ondas de energía a través del espacio. Su clasificación se puede observar en el diagrama 1. Estas ondas pueden provenir de diversas fuentes tanto naturales como artificiales.

Fuentes naturales de radiación incluyen el sol, que emite radiación ultravioleta, y los elementos radiactivos en la corteza terrestre, como el uranio, el torio y el radio, que emiten radiación gamma. Estos elementos se encuentran en pequeñas cantidades en el suelo y las rocas. El uranio se utiliza en reactores nucleares y en la fabricación de armas, mientras que el torio se usa en ciertos tipos de reactores nucleares y en algunas aleaciones metálicas. El radio, aunque se usa menos hoy en día, fue históricamente utilizado en pinturas luminiscentes y tratamientos médicos.

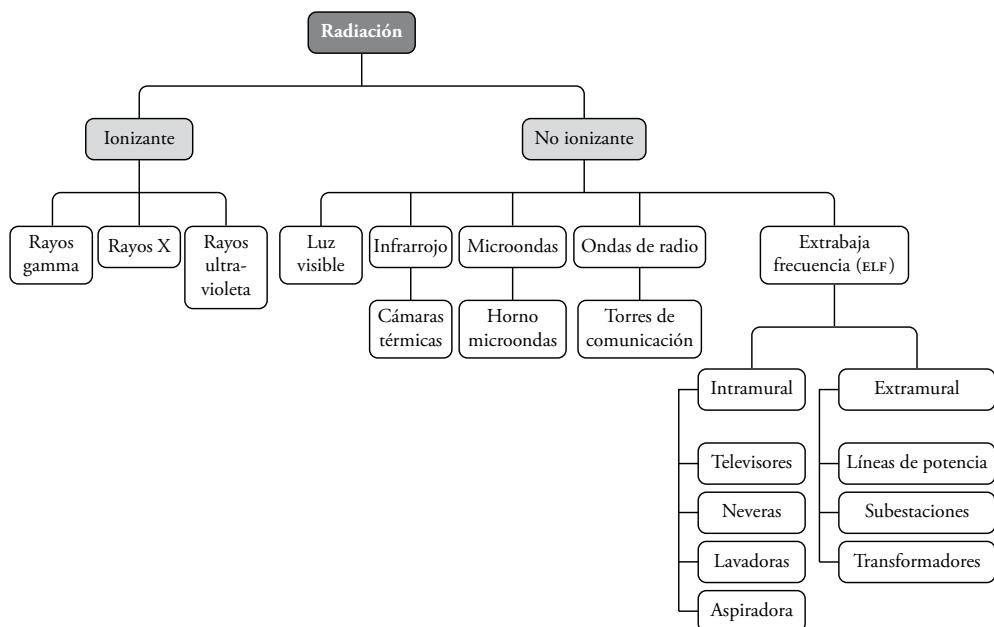


DIAGRAMA 1. Clasificación de los tipos de radiación

Fuente: elaboración propia.

Existen varios tipos de radiación, que se pueden clasificar en dos grandes categorías: radiación ionizante y radiación no ionizante. La primera, entre cuyas manifestaciones se cuentan los rayos X y la radiación gamma, tiene suficiente energía para ionizar los átomos. Es decir, puede arrancarles electrones, lo que podría causar daños a las células y al ADN, y por lo tanto, conducir a problemas de salud graves, como cáncer.

Por otro lado, la radiación no ionizante, como la que emiten los dispositivos eléctricos y electrónicos, no tiene suficiente energía para ionizar los átomos.

En lugar de arrancar electrones, simplemente puede hacer que átomos y moléculas vibren o se muevan. Por esta razón, es considerada menos peligrosa, ya que no provoca daños directos en el material genético de las células. Ejemplos de radiación no ionizante incluyen las ondas de radio, las microondas y los campos electromagnéticos generados por la infraestructura eléctrica.

Un campo electromagnético se compone de un campo eléctrico y un campo magnético (como se observa en el diagrama 2). Para entender esto, primero debemos saber que las *cargas eléctricas* son pequeñas partículas que llevan electricidad. Hay dos tipos de cargas: positivas y negativas. Por otro lado, hemos de saber que los átomos son los bloques de construcción básicos de todo lo que nos rodea, desde los objetos cotidianos hasta nuestro propio cuerpo, y que existen tres tipos principales de partículas subatómicas:

- *Electrones*: son las unidades más pequeñas de materia que componen los átomos. Tienen una carga eléctrica *negativa* y se encuentran orbitando alrededor del núcleo del átomo. Son los responsables de la corriente eléctrica, ya que pueden moverse de un átomo a otro.
- *Protones*: tienen una carga eléctrica *positiva* y se encuentran en el núcleo del átomo. El número de protones en el núcleo determina el elemento químico al que pertenece un átomo. Por ejemplo, un átomo de hidrógeno tiene un protón, mientras que un átomo de carbono tiene seis.
- *Neutrones*: no tienen carga eléctrica (son *neutros*) y también se encuentran en el núcleo del átomo. Ayudan a mantener unidos a los protones en el núcleo mediante la fuerza nuclear fuerte, evitando que se repelan entre sí debido a sus cargas positivas.

En conjunto, estas partículas subatómicas forman los átomos. Los electrones, al moverse entre átomos y a través de materiales conductores como los cables, son los que generan corriente eléctrica y, consecuentemente, los campos eléctricos y magnéticos que hemos mencionado.

Un campo eléctrico se genera cuando hay una diferencia de carga entre dos puntos. Por ejemplo, cuando conectas un electrodoméstico a la corriente eléctrica, se crea un campo eléctrico en el cable porque hay una diferencia de carga entre el enchufe y el electrodoméstico. Este campo puede ejercer una fuerza sobre otras cargas eléctricas, haciendo que se muevan.

Un campo magnético, por otro lado, se produce cuando las cargas eléctricas se mueven. Imagina un cable por el que pasa corriente eléctrica, como el de

un ventilador cuando lo enchufas y lo enciendes. La corriente que fluye está formada por electrones en movimiento, y este movimiento de cargas crea un campo magnético alrededor del cable.

Cuando los campos eléctricos y magnéticos están presentes y cambian juntos, forman un campo electromagnético. Este campo se extiende por el espacio alrededor del objeto que está generando la electricidad y el magnetismo.

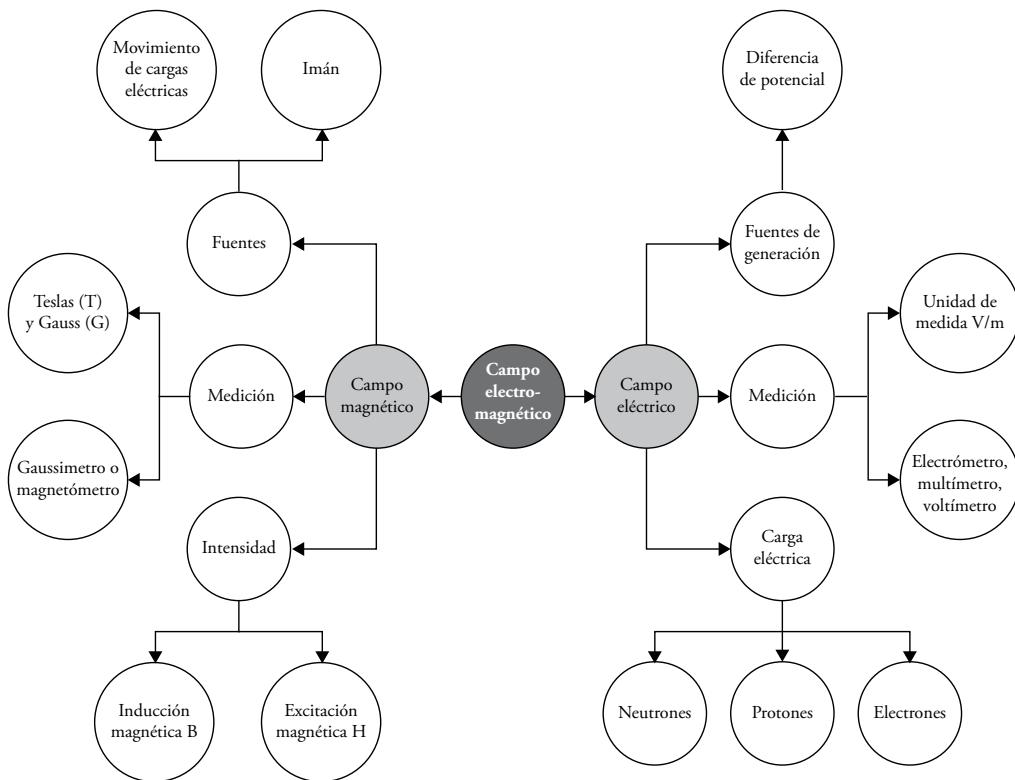


DIAGRAMA 2. Composición del campo electromagnético

Fuente: elaboración propia.

Para relacionarlo con algo cotidiano, pensemos en un horno microondas. Cuando lo enciendes, sus componentes permiten el flujo de carga creado por un campo eléctrico suministrado por la toma de corriente. Al mismo tiempo, el movimiento de la carga corresponde a la corriente eléctrica que genera un campo magnético. El efecto conjunto forma un campo electromagnético que cocina los alimentos.

Diversos dispositivos generan campos electromagnéticos, incluyendo electrodomésticos como hornos microondas, televisores, lavadoras y secadoras, así como la infraestructura eléctrica. Las unidades de medida correspondientes son voltios por metro (V/m) para la intensidad del campo eléctrico y amperios por metro (A/m) para intensidad del campo magnético. En el caso en que las mediciones de estos campos se refieran a la densidad de flujo, las unidades pasan a ser coulomb por metro cuadrado (C/m²) para la densidad de flujo eléctrico y weber por metro cuadrado (Wb/m²) o teslas (T) para la densidad de flujo magnético.

Nos centraremos específicamente en los campos electromagnéticos de frecuencias extremadamente bajas (ELF), que abarcan desde 3 Hz hasta 3 kHz. La frecuencia se refiere al número de veces que una onda completa se repite en un intervalo de un segundo, y se mide en hercios (Hz). Por ejemplo, una frecuencia de 60 Hz significa que la oscilación de la onda electromagnética se repite sesenta veces por segundo. Las frecuencias ELF son típicas de la infraestructura eléctrica, como líneas de transmisión y equipos de distribución de energía.

Es importante destacar que nuestro enfoque está en la radiación no ionizante, especialmente aquella emitida por la infraestructura eléctrica. Otros tipos de radiación —como la de radiofrecuencia, utilizada en comunicaciones inalámbricas— no serán considerados aquí. La radiación no ionizante, a las frecuencias extremadamente bajas de la infraestructura eléctrica, no tiene la capacidad de causar daño directo a las células a través de la ionización, lo que la diferencia de otras formas de radiación.

2.2 Explorar los campos electromagnéticos naturales de baja frecuencia

Este mundo, impregnado de la magia natural de los campos ELF, nos invita a explorar los intrincados vínculos entre el campo magnético terrestre y la vida en la Tierra. En el corazón de esta recopilación se encuentra el deseo de comprender cómo tales campos interactúan con la geomagnetosfera, la atmósfera y la biosfera, y cómo estas interacciones moldean nuestro entorno y afectan a los seres vivos que lo habitan.

2.2.1. La danza cósmica: la influencia geomagnética y solar en las frecuencias extremadamente bajas



FIGURA 4. Danza cósmica

Fuente: generada mediante ChatGPT-Dall E, 2024.

El mundo geomagnético, un ámbito de estudio interdisciplinario, abarca todos los aspectos relacionados con el campo magnético de la Tierra y su influencia en el entorno terrestre. Este ámbito de investigación examina las complejas interacciones entre el campo magnético terrestre y los diferentes

componentes de la atmósfera, la ionosfera y la magnetosfera. Las tormentas geomagnéticas son un área de particular interés dentro del mundo geomagnético. Se trata de perturbaciones temporales en el campo magnético terrestre, generalmente desencadenadas por la actividad solar intensa, como las eyeciones de masa coronal.

Durante una tormenta geomagnética, hay variaciones significativas en la intensidad y la dirección del campo magnético de la Tierra, lo que puede tener impactos diversos en los dispositivos electrónicos, los sistemas de comunicaciones y el medio ambiente. Los estudios sobre tormentas geomagnéticas son fundamentales para comprender cómo estos eventos afectan nuestro planeta. De hecho, han revelado sus interacciones y efectos, dando información invaluable sobre la dinámica del campo magnético terrestre y su interacción con el entorno espacial. Investigaciones recientes han examinado cómo las tormentas geomagnéticas afectan a los campos electromagnéticos de frecuencias extremadamente bajas (ELF) en la cavidad Tierra-ionosfera, alterando tanto su intensidad como su distribución espacial. Este tipo de investigaciones han sido de gran interés en regiones geográficas como Europa del Norte y Japón. En este sentido, se ha explorado la posible relación entre las variaciones geomagnéticas y la salud humana, abordando aspectos como el sueño, el estado de ánimo y el bienestar general, aunque los estudios aún no son concluyentes. La evidencia reportada proporciona una comprensión más profunda de cómo el mundo geomagnético influye en diversos aspectos de la vida en la Tierra y sus habitantes, así como en la tecnología y los sistemas de comunicaciones [9-13].

2.2.2. Tormentas y centelleos: frecuencias extremadamente bajas en las descargas atmosféricas

En el corazón de cada tormenta eléctrica, en ese instante fugaz en el que los relámpagos rasgan el cielo y los truenos retumban en la distancia, se desencadena un fenómeno electromagnético de proporciones majestuosas. Las descargas atmosféricas, además de su impactante espectáculo visual, generan campos electromagnéticos en el rango de frecuencias extremadamente bajas (ELF). Estos campos, resultado de la interacción entre la atmósfera terrestre y la energía liberada por los relámpagos, forman una red intrincada que abraza nuestro planeta. El comportamiento de estos campos ELF durante las tormentas eléctricas constituye un área de investigación apasionante que ha revelado fascinantes

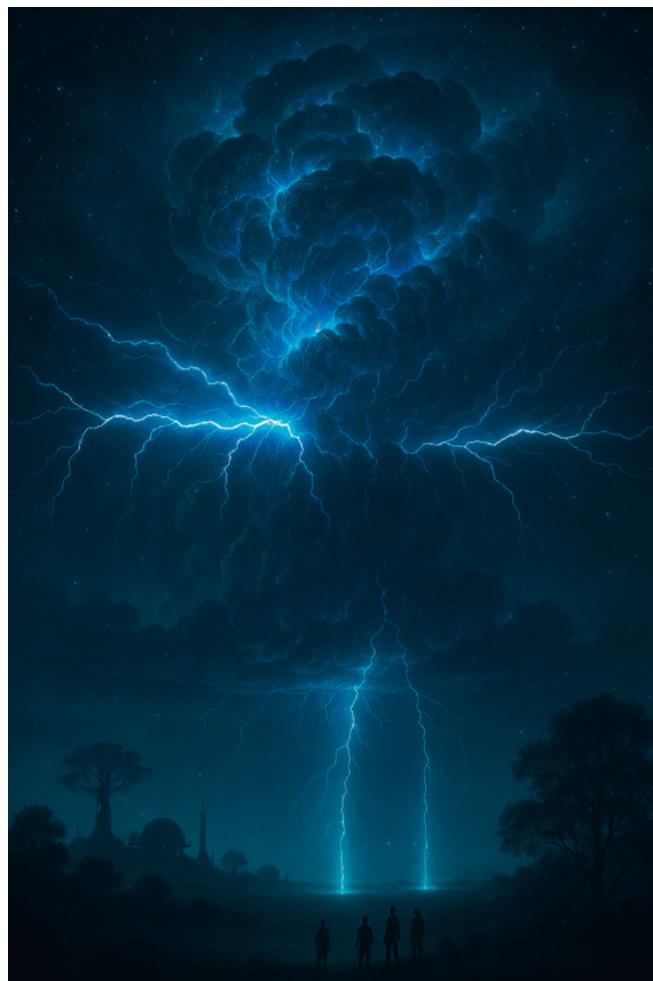


FIGURA 5. Representación gráfica de descarga atmosférica

Fuente: generada mediante ChatGPT-Dall E, 2024.

perspectivas sobre la dinámica atmosférica y sus efectos electromagnéticos. Estudios científicos han demostrado que las descargas atmosféricas, al generar campos electromagnéticos en el rango de ELF, tienen propiedades únicas que influyen en la estructura y el comportamiento de la atmósfera. La interacción entre las descargas atmosféricas y los campos magnéticos terrestres ha sido objeto de intensa investigación, revelando la complejidad de estos fenómenos atmosféricos. Algunos de los fenómenos que se han logrado analizar incluyen el origen de las descargas, el proceso de generación de ondas electromagnéticas, la

interacción entre los campos ELF y otros fenómenos atmosféricos, así como los efectos de estos campos en la atmósfera y la ionosfera terrestres. Estos hallazgos científicos nos permiten comprender mejor la dinámica de las tormentas eléctricas y su impacto en nuestro entorno, así como avanzar en el desarrollo de tecnologías para prevenir y mitigar sus efectos adversos [14-17].

2.2.3. Fauna silvestre: una perspectiva diferente



FIGURA 6. Interconexión entre la vida salvaje y la tecnología

Fuente: generada mediante ChatGPT-Dall E, 2024.

La vida silvestre que habita cerca de áreas urbanas o infraestructuras de comunicación y energía está expuesta constantemente a campos electromagnéticos (CEM), tanto naturales como artificiales. A pesar de que los estudios sobre el impacto de los CEM en la fauna son menos numerosos en comparación con los realizados sobre los humanos, existe evidencia que sugiere efectos significativos en el comportamiento y la salud de diversas especies. En particular, las investigaciones han documentado que el ganado cercano a líneas eléctricas podría experimentar alteraciones en su salud y patrones de conducta, tales como cambios en su comportamiento reproductivo o disminución de la tasa de crecimiento. Por otro lado, las aves migratorias, como ciertas rapaces y las palomas mensajeras, pueden experimentar desviaciones en sus rutas debido a interferencias electromagnéticas que alteran sus capacidades de orientación y navegación. De manera similar, mamíferos como murciélagos y cetáceos, cuya supervivencia depende en gran medida de sus habilidades sensoriales (por ejemplo, ecolocalización en murciélagos y el uso de sonidos de baja frecuencia en cetáceos), podrían sufrir alteraciones en estas capacidades debido a la exposición continua a CEM.

Además, estudios realizados en especies terrestres como ratas y babuinos, que son más accesibles para experimentación, han mostrado que la exposición a campos electromagnéticos de baja frecuencia tiene impactos neurofisiológicos y conductuales. Por ejemplo, McGivern *et al.* investigaron los efectos de los campos magnéticos pulsados de 15 Hz (800 μ T) en ratas macho expuestas prenatalmente durante un intervalo específico de gestación. Las ratas mostraron una disminución en el marcado de olor, un comportamiento clave para la comunicación y la territorialidad, así como un incremento en el tamaño de órganos reproductores como las vesículas seminales, las glándulas prostáticas y los epidídimos, en comparación con los individuos de control [18]. Por su parte, estudios sobre el desarrollo prenatal y posnatal en ratas expuestas a campos eléctricos de 60 Hz revelaron efectos neuroconductuales transitorios, como un aumento en la motilidad y retrasos en reflejos esenciales como el de enderezamiento y el geotropismo. Aunque estos efectos parecieron normalizarse en etapas posteriores, sugieren que la exposición temprana a CEM puede tener repercusiones en el desarrollo neurocognitivo de las especies [19]. Investigaciones adicionales en babuinos expuestos a campos eléctricos de 60 Hz también encontraron cambios significativos en su comportamiento social, incluyendo un aumento en la tensión social, respuestas estereotipadas y una disminución

en la afinidad pasiva entre los individuos, lo que sugiere que los CEM podrían inducir estrés en las poblaciones de primates no humanos [20].

La expansión continua de infraestructuras humanas, como antenas de telefonía móvil, tecnologías inalámbricas y redes de comunicación por satélite, plantea preocupaciones adicionales sobre el impacto de los CEM en los ecosistemas naturales. Estas tecnologías, al aumentar la exposición de una amplia gama de especies a niveles más altos de radiación electromagnética, incrementan el riesgo de efectos adversos sobre la salud y el comportamiento animal. Es fundamental comprender que no solo los individuos se ven afectados, sino que los impactos pueden extenderse a nivel poblacional y ecosistémico. Los cambios en el comportamiento, como alteraciones en la migración, la reproducción o el uso de hábitats, pueden desencadenar desequilibrios en las dinámicas de las comunidades animales, afectando a toda la cadena trófica. Por ejemplo, si las aves migratorias son desviadas de sus rutas debido a interferencias electromagnéticas, esto podría tener efectos en los depredadores que dependen de esas aves como fuente de alimento.

Asimismo, alteraciones en el comportamiento de las especies sociales como los babuinos pueden afectar su estructura social y la cohesión de los grupos, lo que repercute en su capacidad para sobrevivir y reproducirse. De hecho, los impactos en los sistemas sensoriales de mamíferos marinos como los cetáceos pueden tener efectos devastadores en su comunicación y navegación, lo que pondría en peligro su supervivencia a largo plazo, especialmente en un contexto de cambio climático y contaminación acústica.

Por lo tanto, resulta fundamental impulsar más estudios que aborden estos impactos a largo plazo y desarrollar políticas públicas que integren la protección de la biodiversidad con la expansión tecnológica y energética. Estos esfuerzos no solo beneficiarían a la fauna, sino que contribuirían a preservar la estabilidad y sostenibilidad de los ecosistemas que sustentan la vida en el planeta. La implementación de zonas de exclusión de CEM en áreas críticas de biodiversidad, el desarrollo de tecnologías de reducción de emisiones electromagnéticas y la creación de protocolos de evaluación ambiental que incluyan su impacto en la fauna son algunas de las medidas que podrían tomarse para mitigar los riesgos de los CEM. La investigación sobre estos efectos es crucial, pues solo con un enfoque holístico podremos equilibrar el avance de las infraestructuras humanas con la necesidad de conservar los ecosistemas naturales para las futuras generaciones.

2.3. Tejer el paisaje urbano: campo electromagnético en el epicentro residencial

En nuestro entorno urbano, estamos rodeados de diversas fuentes de radiación electromagnética, tanto dentro como fuera de nuestras casas. Las fuentes extramurales, las que están en el exterior, incluyen infraestructuras y dispositivos que emiten radiación electromagnética a diferentes frecuencias. Las antenas de comunicación, como las utilizadas para telefonía móvil y las torres de radiodifusión, son fuentes comunes de radiación electromagnética en las áreas urbanas. Estas antenas operan en el rango de radiofrecuencia, de unos 3 kHz a 300 GHz. En particular, las de telefonía móvil operan en frecuencias típicas de 700 MHz a 2,6 GHz; las de televisión, en rangos entre 54 MHz y 806 MHz, y las de radio, que usan AM y FM, en rangos de 540 kHz a 1,6 MHz y 88 MHz a 108 MHz, respectivamente. Aunque estas antenas son fuentes significativas de radiación, no son el foco principal de nuestro interés, ya que nuestra preocupación se centra en la radiación no ionizante de frecuencias extremadamente bajas (**ELF**), generada por la infraestructura eléctrica [21-27].

La infraestructura eléctrica en áreas urbanas incluye líneas de transmisión, subestaciones y transformadores, elementos esenciales para la distribución de electricidad, que emiten radiación electromagnética en el rango de frecuencias **ELF**, entre 50 Hz y 60 Hz dependiendo de la región. Este tipo de radiación es de particular interés porque está presente en nuestro entorno residencial y puede influenciar a las personas debido a su proximidad. Las líneas de transmisión y distribución transportan electricidad a largas distancias y pueden estar cerca de zonas residenciales. La radiación **ELF** que emiten depende de la cantidad de corriente que transportan. Las subestaciones, responsables de transformar la electricidad de alta tensión a niveles más bajos, adecuados para el consumo doméstico, están ubicadas en áreas urbanas y también pueden emitir campos electromagnéticos **ELF**. Los transformadores, a menudo situados en postes eléctricos cerca de hogares o incluso en el subsuelo, transforman la corriente a niveles utilizables para los hogares. Es importante destacar que la mayoría de las mediciones de radiación electromagnética se realizan a un metro de distancia de las fuentes. Sin embargo, estas mediciones no siempre tienen en cuenta las condiciones específicas en las que pueden estar los transformadores o las líneas muy cercanos a las casas, lo que podría aumentar la exposición a la radiación **ELF**.

Una estrategia común en las áreas urbanas para reducir el impacto visual y minimizar la exposición potencial a campos electromagnéticos es la subterranización de las líneas eléctricas. Sin embargo, aunque esta práctica puede disminuir la exposición en la superficie, no elimina completamente los campos electromagnéticos. Las líneas subterráneas pueden generar radiación ELF, aun cuando la tierra actúa como un escudo parcial.

La proximidad de infraestructuras eléctricas como subestaciones y transformadores a las áreas residenciales es una preocupación importante. Por tanto, se deben comprender y monitorear esas fuentes de radiación electromagnética ELF en nuestro entorno urbano, especialmente aquellas relacionadas con la infraestructura eléctrica. Al hacerlo, podemos tomar conciencia de que vivimos rodeados de estas emisiones y reconocer la presencia continua de campos electromagnéticos ELF en nuestras vidas cotidianas.

Para comprender mejor cómo nos rodean los campos electromagnéticos ELF es útil conocer el funcionamiento básico de la infraestructura eléctrica. La electricidad se genera en plantas de energía, que utilizan diversas fuentes, como combustibles fósiles o energía nuclear, hidroeléctrica, eólica o solar. Esta electricidad se produce a alta tensión para poder transportarla eficientemente a largas distancias a través de líneas de transmisión.

Las líneas de transmisión llevan la electricidad desde las plantas de energía hasta las subestaciones, componentes cruciales donde la tensión se reduce a niveles más bajos para su distribución en áreas residenciales e industriales. Desde las subestaciones, la electricidad se transporta a través de redes de distribución que incluyen líneas aéreas y subterráneas, transformadores y postes eléctricos.

Los transformadores, ubicados en postes o subterráneos, reducen la electricidad a niveles aún más bajos, que pueden ser utilizados de manera segura en nuestros hogares y negocios. Cada componente emite campos electromagnéticos ELF por el flujo de corriente eléctrica a través de cables y equipos.

En las plantas de energía, grandes generadores convierten diversas formas de esta en electricidad. Por ejemplo, en una planta de energía a carbón, este se quema para calentar agua y producir vapor, el cual mueve una turbina conectada a un generador. En una planta hidroeléctrica, el agua en movimiento hace girar una turbina que también está conectada a un generador. Independientemente de la fuente, el generador produce electricidad que luego es enviada a una subestación.

Las subestaciones son puntos intermedios clave donde la electricidad de alta tensión, que llega a través de las líneas de transmisión, se reduce a un nivel

de tensión adecuado para la distribución local. En las subestaciones, grandes transformadores convierten la electricidad de tensiones muy altas a tensiones más bajas, seguras para transportarse por las redes de distribución que llegan a nuestros hogares y lugares de trabajo.

Las redes de distribución pueden incluir tanto líneas aéreas como subterráneas. Las aéreas son comunes en muchas áreas debido a su menor costo de instalación y mantenimiento. Sin embargo, en áreas urbanas densamente pobladas o donde se busca minimizar el impacto visual y el riesgo de interrupciones por fenómenos naturales, las líneas subterráneas son la opción preferida: aunque más costosas de instalar, ofrecen una mayor protección contra daños externos y pueden ayudar a reducir la exposición directa a los campos electromagnéticos en la superficie.

En el nivel final de distribución, los transformadores en postes eléctricos o subterráneos desempeñan un papel vital: reducen aún más la tensión de la electricidad a niveles seguros y utilizables en nuestros hogares y negocios. Por ejemplo, un transformador típico puede reducir la tensión de 11 000 voltios a los 120 o 240 que encontramos en nuestras tomas de corriente domésticas.

Cada componente de este sistema, desde la generación hasta la distribución final, emite campos electromagnéticos ELF debido al movimiento de corrientes eléctricas a través de cables y equipos. Estos campos forman parte del entorno en el que vivimos y son una característica constante de nuestra infraestructura eléctrica moderna. Comprender este proceso nos ayuda a apreciar cómo la infraestructura eléctrica genera campos ELF y cómo estos están presentes en nuestro entorno diario, tanto en el exterior como dentro de nuestras casas.

2.3.1. Breve historia de la infraestructura eléctrica

La infraestructura eléctrica ha experimentado una evolución significativa desde sus inicios a fines del siglo XIX. No solo ha cambiado la forma en que generamos y distribuimos electricidad, sino que han cambiado también los niveles y tipos de exposición a campos electromagnéticos de frecuencias extremadamente bajas (ELF).

El desarrollo de tal infraestructura comenzó con la invención de la luz eléctrica. Thomas Edison, en 1879, desarrolló la primera bombilla incandescente práctica, y poco después, en 1882, inauguró la primera central eléctrica

en Nueva York. Esta planta utilizaba corriente continua (cc) para distribuir electricidad a un número limitado de clientes en un área pequeña.

Sin embargo, la tecnología de corriente continua presentaba limitaciones en cuanto a la transmisión a largas distancias. Entonces Nikola Tesla y George Westinghouse introdujeron el sistema de corriente alterna (ca), que permitía transmitir electricidad a mayores distancias de forma eficiente. En 1896, la primera central hidroeléctrica en las cataratas del Niágara comenzó a suministrar electricidad a la ciudad de Búfalo utilizando corriente alterna, un hito en la historia de la infraestructura eléctrica [13].

Durante el siglo xx, la infraestructura eléctrica continuó expandiéndose rápidamente: se construyeron plantas de energía más grandes, utilizando una variedad de fuentes de energía como carbón, gas natural, energía nuclear e hidroeléctrica, y las redes eléctricas se extendieron para conectar regiones enteras, creando lo que hoy conocemos como *redes eléctricas nacionales o interconectadas*.

2.3.2. Cambios en los niveles de exposición a campos de frecuencias extremadamente bajas debido a la evolución tecnológica

A medida que la infraestructura eléctrica se ha desarrollado, también lo han hecho los niveles y tipos de exposición a campos ELF. En los primeros días de la electricidad, la exposición a estos estaba limitada principalmente a las inmediaciones de las plantas de energía y las pocas áreas urbanas servidas por las primitivas redes.

Con la adopción generalizada de la corriente alterna y la expansión de la red eléctrica, la exposición a campos ELF se convirtió en un fenómeno más común. Las líneas de transmisión de alta tensión, que transportan electricidad a largas distancias, generan campos magnéticos significativos debido a las altas corrientes que conducen. Esas líneas a menudo pasan cerca de áreas residenciales, lo cual aumenta la exposición del público a los campos ELF.

En las décadas siguientes, el aumento de la demanda de electricidad llevó a la construcción de más subestaciones y la instalación de más transformadores en áreas urbanas. Estos dispositivos, aunque esenciales para la distribución de electricidad, también son fuentes de campos ELF. Además, la proliferación de electrodomésticos y dispositivos electrónicos en los hogares ha contribuido a un incremento en la exposición a tales campos dentro de las residencias.

En tiempos más recientes, la evolución tecnológica ha introducido nuevas fuentes de campos ELF y ha cambiado los patrones de exposición. Por ejemplo, usar dispositivos electrónicos y electrodomésticos más eficientes, aunque reduce el consumo de electricidad, no disminuye la exposición a campos electromagnéticos, ya que aún los generan cuando funcionan.

La implementación de tecnologías de subterráneización de líneas eléctricas ha modificado la forma en que las personas están expuestas a los campos ELF. Las líneas subterráneas tienden a reducir la exposición directa en la superficie, pero no eliminan completamente la presencia de campos electromagnéticos, ya que estos pueden aún ser detectados, aunque a niveles reducidos.

Además, las redes eléctricas modernas, que incluyen tecnologías como los medidores inteligentes y la gestión avanzada de la energía, también generan campos ELF. Estos sistemas, diseñados para mejorar la eficiencia y la confiabilidad del suministro eléctrico, introducen nuevas dinámicas de exposición.

2.3.3. Implicaciones futuras y tendencias en la infraestructura eléctrica

La infraestructura eléctrica está en constante evolución, impulsada por la necesidad de adaptarse a la creciente demanda de energía sostenible y eficiente. Una de las tendencias más significativas es la integración de fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, en la red eléctrica. Estas fuentes, que se conectan a través de sistemas descentralizados, están cambiando los patrones de generación y distribución de electricidad. La descentralización puede afectar la exposición a los campos electromagnéticos ELF generados por los inversores solares y los convertidores de energía eólica. Aunque estos niveles generalmente se consideran seguros, la proliferación de dichos dispositivos en áreas residenciales podría aumentar la exposición local a ELF.

Otra tendencia clave es la implementación de tecnologías de redes inteligentes (*smart grids*), que permiten una gestión más eficiente y flexible del suministro eléctrico. Tales redes utilizan dispositivos avanzados de monitoreo y control que optimizan el flujo de electricidad y reducen las pérdidas. Estos dispositivos, como los medidores inteligentes y los sensores de red, también generan campos electromagnéticos ELF. La distribución más equitativa de la carga eléctrica y la capacidad de detectar y mitigar rápidamente las anomalías pueden reducir la exposición a dichos campos en algunas áreas, pero la

densidad de dispositivos electrónicos también puede aumentar la exposición en otros contextos.

El aumento en la adopción de vehículos eléctricos (EV) y en la infraestructura de carga asociada es otra tendencia que podría influir en la exposición a campos ELF. Las estaciones de carga y los propios EV (sea que estén en funcionamiento o cargándose) generan campos electromagnéticos. A medida que más personas utilicen vehículos eléctricos, será crucial evaluar y gestionar la exposición a campos ELF asociada con esta tecnología. Las estaciones de carga rápida, en particular, pueden generar campos significativos que deben ser estudiados y regulados adecuadamente.

La modernización de la red eléctrica también incluye su subterraneización, una práctica cada vez más común en áreas urbanas para minimizar el impacto visual y proteger la infraestructura de daños externos. Aunque puede reducir la exposición directa a campos ELF en la superficie, esa práctica no los elimina completamente. Aunque las líneas subterráneas también contribuyan con la generación campos electromagnéticos, la intensidad de los campos que alcanzan la superficie se reduce significativamente dado que el suelo actúa como un escudo parcial.

Además, la investigación y el desarrollo continuos en tecnologías de mitigación de campos electromagnéticos jugarán un papel crucial en el futuro de la infraestructura eléctrica. Innovaciones como materiales de blindaje más efectivos, diseños de equipos optimizados y técnicas avanzadas de monitoreo y control pueden ayudar a reducir la exposición. Por ejemplo, el uso de configuraciones geométricas específicas para los conductores en líneas de transmisión puede ayudar a cancelar parcialmente los campos ELF generados, lo que reduce la exposición total.

La colaboración entre científicos, ingenieros, reguladores y el público será esencial para desarrollar soluciones que equilibren la necesidad de energía eficiente y sostenible con la protección de la salud pública. Las normativas y los estándares de seguridad deberán evolucionar para reflejar los avances tecnológicos y los nuevos patrones de exposición. La revisión continua de la evidencia científica sobre los efectos de los campos ELF informará estos estándares, lo cual asegurará que se mantengan dentro de límites seguros.

2.4. En el corazón del hogar: campos electromagnéticos y electrodomésticos

Dentro del hogar, la infraestructura eléctrica se manifiesta en una variedad de dispositivos y electrodomésticos que facilitan nuestra vida diaria. Estos aparatos no solo consumen electricidad, sino que también generan campos electromagnéticos ELF, los cuales forman parte del entorno electromagnético en el que vivimos [21-27].

2.4.1. Dispositivos que emiten campos en frecuencias extremadamente bajas

Numerosos electrodomésticos comunes en el hogar emiten campos ELF debido al flujo de corriente eléctrica a través de sus componentes. Algunos de los dispositivos más relevantes incluyen:

- Refrigeradores: sus motores y compresores generan campos ELF cuando están en funcionamiento.
- Lavadoras y secadoras: especialmente durante los ciclos de lavado y secado, emiten campos ELF debido a sus motores y resistencias eléctricas.
- Hornos microondas: aunque su principal emisión es en el rango de las microondas, sus componentes eléctricos también generan campos ELF.
- Televisores y computadoras: sus transformadores y otros componentes eléctricos emiten campos ELF.
- Aspiradoras: sus motores eléctricos generan campos ELF durante su uso.
- Cargadores de dispositivos electrónicos: aunque los campos generados suelen ser débiles, son una fuente de campos ELF.

2.4.2. Dispositivos que no emiten campos en frecuencias extremadamente bajas

Por otro lado, algunos dispositivos no emiten campos ELF o lo hacen en niveles insignificantes:

- Lámparas led: emiten campos electromagnéticos en frecuencias diferentes y generalmente no generan niveles significativos de campos ELF.
- Dispositivos alimentados por batería: dispositivos como relojes de pared o algunos juguetes no emiten campos ELF cuando no están conectados a la red eléctrica.
- Electrodomésticos de cocina sin motores: utensilios como batidoras manuales o cuchillos eléctricos, que no tienen motores eléctricos, no emiten campos ELF.

2.4.3. Normativas y medidas de seguridad

La seguridad en la emisión de campos ELF por parte de los electrodomésticos está regulada en algunos países, aunque no de manera uniforme en todo el mundo. A continuación se describen algunas normativas y medidas que las empresas deben seguir:

- Directrices de la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP): aunque son más conocidas por regular la exposición a campos electromagnéticos en entornos ocupacionales y públicos, también se aplican indirectamente a los electrodomésticos. Las empresas pueden diseñar sus productos para cumplir con estos límites, asegurando que los niveles de campos ELF se mantengan dentro de lo considerado como seguro.
- Normas de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC): la IEC establece estándares internacionales para la seguridad eléctrica de electrodomésticos, que incluyen requisitos para minimizar la emisión de campos electromagnéticos. Por ejemplo, la norma IEC 60335-1 abarca la seguridad de los aparatos electrodomésticos y análogos.
- Regulaciones nacionales: en algunos países existen regulaciones específicas que los fabricantes deben cumplir. Por ejemplo, en la Unión Europea, la Directiva de Compatibilidad Electromagnética (EMC) requiere que los productos electrónicos no interfieran con otros dispositivos y cumplan con los límites de emisión de campos electromagnéticos.
- Medidas de seguridad en el diseño: los fabricantes implementan diversas medidas de seguridad para minimizar la emisión de campos ELF, como el uso de materiales de blindaje, el diseño de circuitos que reduzcan las

corrientes parásitas y la optimización de los componentes eléctricos para minimizar la generación de campos electromagnéticos.

2.4.4. Importancia de la conciencia y las buenas prácticas

Aunque los electrodomésticos modernos están diseñados para emitir campos ELF dentro de límites seguros, es importante que los consumidores sean conscientes de su entorno electromagnético y adopten buenas prácticas para minimizar la exposición. Algunas recomendaciones incluyen utilizar equipos certificados. Optar por electrodomésticos y dispositivos electrónicos que cumplan con las normativas de seguridad reconocidas puede garantizar que se mantengan dentro de los límites seguros de emisión de campos ELF.

Capítulo 3. Frecuencias extremadamente bajas en el panorama mundial



FIGURA 7. Frecuencias extremadamente bajas en diferentes regiones del mundo

Fuente: generada mediante ChatGPT-Dall E, 2024.

3.1. Estudios y hallazgos relevantes en diferentes regiones del mundo

América del Norte: Estados Unidos y Canadá. La investigación y regulación de los campos ELF es un esfuerzo significativo realizado principalmente por agentes clave como Southern California Edison (SCE) en Estados Unidos e

Hydro-Québec en Canadá. Estos agentes han sido pioneros en la investigación de los efectos de las ELF y la divulgación de sus hallazgos para garantizar la seguridad pública.

SCE, una de las principales empresas de servicios públicos en Estados Unidos, ha llevado a cabo investigaciones exhaustivas sobre los efectos de los campos ELF generados por sus infraestructuras eléctricas. La empresa colabora con instituciones académicas y centros de investigación para estudiar los posibles impactos de estos campos en la salud humana. Los estudios que ha financiado abarcan desde investigaciones epidemiológicas hasta experimentos biofísicos que proporcionan una base científica sólida para evaluar los riesgos asociados a la exposición a ELF. Además, SCE promueve las directrices establecidas por la ICNIRP y otras organizaciones reguladoras, lo cual asegura que sus operaciones cumplan con los estándares de seguridad más estrictos.

Hydro-Québec, empresa estatal de electricidad en Canadá, también desempeña un papel crucial en la investigación y regulación de las ELF, pues ha financiado numerosos estudios para evaluar sus posibles efectos en la salud pública y el medio ambiente. La empresa, además, ha desarrollado programas educativos y recursos en línea para aumentar la conciencia pública sobre los campos electromagnéticos y sus impactos. Estos programas incluyen informes detallados y herramientas interactivas que permiten al público explorar los niveles de exposición a las ELF en diferentes entornos. Hydro-Québec también colabora con otras empresas de servicios públicos y organismos reguladores en América del Norte para compartir conocimientos y mejores prácticas en la gestión de tales campos.

Europa: España, Francia e Irlanda. La gestión y regulación de los campos ELF es liderada por agentes como la Red Eléctrica de España (REE) y RTE en Francia. Ambos agentes han sido fundamentales en la provisión de datos detallados sobre los campos eléctricos y magnéticos generados por sus infraestructuras, así como en la realización de estudios que garantizan la seguridad de estos campos.

REE ha implementado una serie de iniciativas para monitorizar y gestionar los campos ELF en su red de transmisión. La empresa sigue las normativas internacionales de la ICNIRP y publica regularmente sus hallazgos para mantener la transparencia frente al público. También colabora con universidades y centros de investigación para realizar estudios epidemiológicos y biofísicos que evalúan los posibles efectos de los campos ELF en la salud humana. Estos estudios incluyen la medición de los niveles de exposición en áreas residenciales y la evaluación de los posibles riesgos asociados a la proximidad a infraestructuras eléctricas.

En Francia, RTE lleva a cabo actividades similares, proporcionando datos detallados sobre los campos eléctricos y magnéticos generados por su red de transmisión. La empresa sigue estrictamente las directrices de la ICNIRP y trabaja en colaboración con agencias gubernamentales y organismos reguladores para asegurar que sus operaciones cumplan con los estándares de seguridad. Además, participa en proyectos de investigación europeos que buscan mejorar la comprensión de los efectos de los campos ELF y desarrollar nuevas tecnologías para mitigar cualquier riesgo potencial.

En Irlanda, EirGrid, autoridad responsable de la gestión de la red eléctrica, ha adoptado un enfoque educativo robusto para aumentar la conciencia pública sobre los campos ELF y se ha comprometido a proporcionar información transparente y accesible sobre los campos electromagnéticos a través de una variedad de medios. En efecto, en su calidad de empresa pública ha desarrollado una serie de recursos educativos, incluyendo folletos informativos, sitios web y herramientas interactivas, diseñados para educar al público sobre los campos ELF y sus posibles impactos en la salud. Estos recursos están disponibles en múltiples idiomas y son accesibles a través de su página web. Además, EirGrid organiza eventos comunitarios y talleres para proporcionar información directa y responder a las preocupaciones del público sobre los campos electromagnéticos. La empresa también colabora con instituciones académicas y organizaciones internacionales para llevar a cabo investigaciones y estudios sobre los efectos de dichos campos, lo cual asegura que sus hallazgos sean compartidos de manera abierta y transparente.

Asia: Japón. El Japan EMF Information Center es un agente clave en la investigación y divulgación de información sobre los campos ELF. Este centro se dedica a aumentar la conciencia pública sobre los campos electromagnéticos y sus posibles impactos en la salud a través de actividades educativas y recursos informativos. Proporciona una amplia gama de recursos, incluyendo folletos, sitios web y recursos interactivos, que están diseñados para educar al público sobre los campos ELF y sus posibles efectos. El centro colabora con expertos y organizaciones internacionales para investigar los efectos de los campos electromagnéticos y proporcionar datos precisos y accesibles al público. Además, organiza seminarios y talleres para profesionales de la salud y el público en general, con el objetivo de difundir información actualizada y basada en evidencia sobre dichos campos.

Otras organizaciones y agencias: Electric Power Research Institute (EPRI) es una organización de investigación independiente, que realiza estudios sobre

los efectos de las ELF y desarrolla herramientas como EMF Around You para proporcionar información detallada y accesible sobre los niveles de exposición a estos campos [28]. La Agence Nationale des Fréquences (ANFR) se encarga de la regulación de las frecuencias radioeléctricas en Francia. Proporciona herramientas como Cartoradio, que permite a los usuarios acceder a mapas detallados de exposición a ondas electromagnéticas en todo el territorio francés.

3.1.1. Roles y responsabilidades

A continuación, se describen las funciones específicas de algunos agentes clave en la gestión de las ELF, que abarcan investigación, regulación, monitoreo y divulgación de información, entre otras:

1. *Red Eléctrica de España (REE)*: es responsable de la transmisión de electricidad en España. Su rol incluye la medición y monitoreo de los campos ELF generados por sus infraestructuras eléctricas. Además, realiza estudios epidemiológicos y biofísicos para evaluar los posibles efectos de tales campos en la salud y sigue las directrices internacionales para garantizar la seguridad del público.
2. *Hydro-Québec*: es la principal empresa de servicios eléctricos en Quebec, Canadá. Investiga los efectos de los campos ELF en la salud humana y el medio ambiente. Además, financia estudios científicos y participa en proyectos de investigación para mejorar la comprensión de dichos efectos.
3. *RTE (Francia)*: gestiona la red de transmisión eléctrica en Francia y es responsable de proporcionar datos sobre los campos eléctricos y magnéticos generados por su infraestructura. Realiza investigaciones continuas y publica sus hallazgos para mantener la transparencia frente al público.
4. *Southern California Edison (SCE)*: una de las mayores empresas de servicios eléctricos en Estados Unidos. Lleva a cabo investigaciones exhaustivas sobre las ELF y sus posibles impactos en la salud. Colabora con instituciones académicas para desarrollar estudios en torno al tema y asegura el cumplimiento de las normativas internacionales.
5. *EirGrid (Irlanda)*: gestiona la red de transmisión eléctrica en Irlanda y se enfoca en la educación pública sobre los campos ELF. Proporciona recursos informativos y organiza eventos para aumentar la conciencia pública sobre los posibles efectos de estos campos.

6. *Electric Power Research Institute (EPRI)*: es una organización de investigación independiente, que realiza estudios sobre los efectos de las ELF y desarrolla herramientas como EMF Around You para proporcionar información detallada y accesible sobre los niveles de exposición a estos campos [28].
7. *Agence Nationale des Fréquences (ANFR)*: se encarga de la regulación de las frecuencias radioeléctricas y proporciona herramientas como Cartoradio, que permite a los usuarios acceder a mapas detallados de exposición a ondas electromagnéticas en todo el territorio francés.
8. *Japan EMF Information Center*: se dedica a la educación pública sobre los campos ELF en Japón, proporcionando recursos informativos y colaborando con investigadores para llevar a cabo estudios sobre el tema y difundir sus hallazgos.

3.1.2. Colaboraciones internacionales

La colaboración entre los mencionados agentes y de estos con organizaciones internacionales es esencial para la gestión efectiva de los campos ELF. Una de las principales organizaciones con las que colaboran es la ICNIRP, que establece directrices globales para la exposición a campos electromagnéticos, incluidos los de ELF, basada en la evaluación científica de los riesgos para la salud.

1. *Colaboración entre agentes*: los agentes clave interactúan para compartir conocimientos y mejores prácticas. Por ejemplo, REE y RTE pueden compartir datos y métodos de investigación para mejorar sus estudios sobre los efectos de las ELF. Hydro-Québec y SCE, por su parte, trabajan en proyectos de investigación conjuntos para evaluar los impactos de dichos campos.
2. *Participación en proyectos internacionales*: muchos de estos agentes participan en proyectos patrocinados por organizaciones como la ICNIRP y la Organización Mundial de la Salud (OMS). Estos proyectos buscan mejorar la comprensión global de los efectos de las ELF y desarrollar directrices para su gestión segura.
3. *Intercambio de información*: la colaboración internacional también implica el intercambio de información sobre normativas y políticas. Los agentes comparten sus enfoques regulatorios y resultados de

investigaciones a través de conferencias y publicaciones científicas, lo que ayuda a armonizar las normativas a nivel global. Los tópicos principales que se suelen abordar durante los intercambios se pueden visualizar en el diagrama 3.

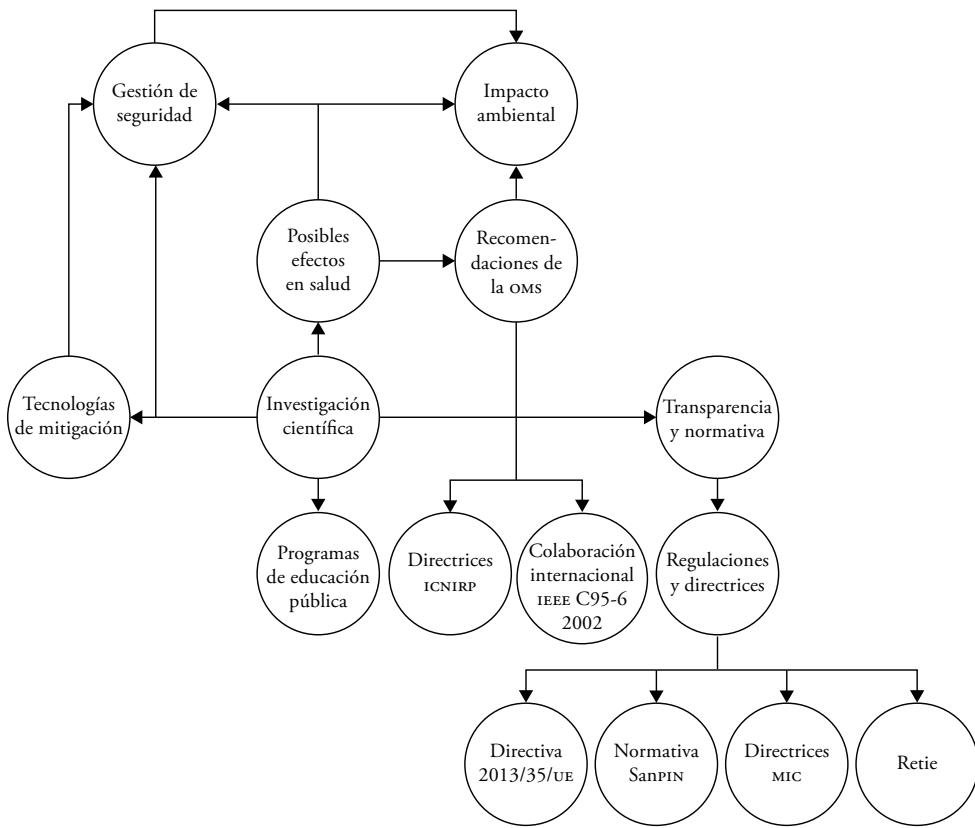


DIAGRAMA 3. Colaboración entre agentes clave para la gestión de los campos en frecuencias extremadamente bajas

Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Financiamiento de investigaciones

El financiamiento de investigaciones sobre los campos ELF es crucial para avanzar en el conocimiento científico y garantizar la seguridad pública. Los agentes clave utilizan diversos mecanismos para financiar estos estudios:

1. *Fondos propios*: muchas empresas de servicios públicos, como SCE e Hydro-Québec, asignan fondos internos para financiar investigaciones sobre las ELF. Estos fondos se utilizan para apoyar estudios epidemiológicos, biofísicos y ambientales que evalúan los posibles efectos de dichos campos.
2. *Colaboraciones académicas*: los agentes colaboran con instituciones académicas y centros de investigación, y proporcionan financiamiento para proyectos específicos. Estas colaboraciones permiten realizar estudios más amplios y detallados.
3. *Subvenciones gubernamentales*: en algunos casos, los agentes pueden recibir recursos de agencias gubernamentales para apoyar sus investigaciones. Por ejemplo, los proyectos de investigación en los que participa EPRI pueden ser cofinanciados por el gobierno y la industria.
4. *Consorcios de investigación*: algunos agentes forman parte de asociaciones que agrupan recursos de múltiples organizaciones para financiar estudios a gran escala. Estos consorcios permiten una investigación más robusta y coordinada.

3.1.4. Plataformas de información y transparencia

La transparencia y la accesibilidad a la información son fundamentales para ganar la confianza del público y asegurar una gestión responsable de los campos ELF. A continuación, se describen algunas de las herramientas y plataformas desarrolladas por los agentes clave:

1. *EMF Around You* de EPRI: herramienta interactiva que permite al público explorar los niveles de exposición a campos magnéticos y eléctricos en diferentes entornos. Proporciona datos detallados y accesibles que ayudan a los usuarios a comprender mejor los riesgos asociados a las ELF. La plataforma incluye mapas y gráficos que muestran los niveles de exposición en tiempo real.
2. *Cartoradio de ANFR*: es una herramienta que permite a los usuarios acceder a mapas detallados que muestran la ubicación de sitios radioeléctricos y a mediciones de exposición a ondas electromagnéticas en Francia. Esta plataforma ofrece un alto nivel de transparencia y permite a los usuarios tomar decisiones informadas sobre su exposición a las ELF.

3. *Recursos educativos de EirGrid*: se trata de una serie de recursos informativos, incluidos folletos, sitios web y herramientas interactivas, diseñados para educar al público sobre los campos ELF. Estos recursos son accesibles y están disponibles en múltiples idiomas, lo que facilita la comprensión de los posibles efectos de tales campos.
4. *Informes de transparencia de REE y RTE*: ambas instituciones publican informes detallados sobre los resultados de sus estudios y las medidas de seguridad implementadas. Estos informes están disponibles en sus sitios web y se actualizan regularmente para mantener al público informado.

3.1.5. Educación y concienciación pública

La educación y concienciación pública sobre los campos ELF es esencial para asegurar que la población esté informada sobre los posibles riesgos y las medidas de seguridad. Diversos agentes han implementado programas educativos que incluyen una variedad de recursos destinados a aumentar la comprensión pública de dichos campos y sus efectos.

1. REE ha desarrollado una serie de iniciativas educativas para informar al público sobre los campos ELF. Estos programas incluyen la publicación de folletos informativos, la creación de sitios web con información detallada y la organización de talleres y seminarios. La empresa también colabora con instituciones académicas para realizar estudios cuyos resultados son accesibles al público. Además, ofrece visitas guiadas a sus instalaciones para que los ciudadanos puedan observar de primera mano cómo se gestiona la transmisión de electricidad y cómo se monitorean los campos ELF.
2. Hydro-Québec proporciona recursos educativos extensivos, que incluyen informes técnicos, artículos informativos y herramientas interactivas en línea. Estos recursos están diseñados para explicar claramente qué son los campos ELF, cómo se generan y cuáles son sus posibles efectos en la salud. La empresa también participa en ferias científicas y eventos comunitarios, ofreciendo charlas y materiales educativos para aumentar la conciencia pública sobre el tema.
3. El Japan EMF Information Center ha establecido un enfoque educativo robusto que incluye la distribución de folletos informativos, la creación

de recursos en línea y la organización de seminarios y talleres. Estos recursos están disponibles en varios idiomas y se actualizan regularmente para reflejar los últimos avances científicos. El centro también utiliza plataformas interactivas para educar al público sobre los niveles de exposición a **ELF** y las medidas de seguridad recomendadas.

4. EirGrid, en Irlanda, ha implementado programas educativos que incluyen la publicación de guías y folletos, la creación de un sitio web con información detallada y la organización de eventos comunitarios. La empresa también colabora con escuelas y universidades para desarrollar materiales educativos que se utilizan en el currículo académico. Además, ofrece una línea directa y un servicio de consultas en línea para responder a las preguntas del público sobre los campos **ELF**.

3.1.6. Impacto en la percepción pública

Las iniciativas educativas y los programas de concienciación tienen un impacto significativo en la percepción pública sobre los campos **ELF**. A través de la provisión de información transparente y accesible, los agentes clave pueden aliviar las preocupaciones del público y aumentar la confianza en la gestión de dichos campos.

1. *Reducción de la ansiedad y la desinformación.* Uno de los efectos más importantes de estos programas. Cuando el público tiene acceso a información clara y basada en evidencia, es menos probable que se deje influenciar por rumores o información incorrecta. Por ejemplo, los recursos educativos de REE e Hydro-Québec han ayudado a muchas personas a comprender que los niveles de exposición a **ELF** en áreas residenciales están muy por debajo de los límites recomendados por la ICNIRP, lo que ha contribuido a reducir el miedo y la preocupación.
2. *Aumento de la confianza en las instituciones.* Las iniciativas de transparencia y la provisión de información detallada también aumentan la confianza del público en las instituciones responsables de la gestión de los campos **ELF**. Cuando las empresas y los organismos reguladores son abiertos y honestos sobre los riesgos potenciales y las medidas de seguridad, el público tiende a confiar más en sus decisiones y acciones. EirGrid, por ejemplo, ha visto un aumento en la confianza pública

gracias a sus esfuerzos por educar y comprometerse con las comunidades locales.

3. *Facilitar la participación comunitaria.* La educación y la concienciación pública también facilitan la participación comunitaria en la toma de decisiones relativas a la ubicación de infraestructuras eléctricas. Cuando las comunidades están bien informadas, pueden participar de manera más efectiva en los procesos de consulta pública y contribuir a decisiones mejor fundamentadas. Los programas educativos de Hydro-Québec y el Japan EMF Information Center han empoderado a la ciudadanía para que participe activamente en la planificación y gestión de las infraestructuras eléctricas.

3.1.7. Campañas de sensibilización

Varios agentes han llevado a cabo campañas de sensibilización exitosas, que han incidido mucho en la percepción pública y la gestión de las ELF. A continuación, se presentan algunos ejemplos destacados.

1. REE lanzó una campaña de sensibilización para informar al público sobre la seguridad de los campos ELF generados por sus infraestructuras. La campaña incluyó la distribución de folletos informativos, anuncios en medios de comunicación y la organización de eventos comunitarios. Uno de sus aspectos más exitosos fue usar testimonios de expertos y profesionales de la salud que explicaron los resultados de los estudios científicos. Se redujeron así las preocupaciones del público y aumentó la confianza en la gestión de los campos ELF por parte de la empresa.
2. Hydro-Québec ha llevado a cabo varias iniciativas de educación pública muy efectivas. Una de las más destacadas fue una serie de talleres y seminarios dirigidos a comunidades cercanas a nuevas infraestructuras eléctricas. Estos eventos proporcionaron información detallada sobre los campos ELF y permitieron a los asistentes hacer preguntas y expresar sus preocupaciones. La retroalimentación de los participantes indicó que estos talleres aumentaron significativamente su comprensión de dichos campos y su confianza en las medidas de seguridad implementadas por la empresa.

3. EirGrid lanzó una campaña de sensibilización en comunidades locales afectadas por la expansión de la red eléctrica. La campaña incluyó la distribución de material educativo, reuniones comunitarias y un portal en línea con información detallada sobre los proyectos y los campos ELF. La transparencia y el compromiso directo con las comunidades ayudaron a mitigar las preocupaciones y aumentaron la aceptación de los proyectos. Los residentes valoraron la oportunidad de interactuar directamente con los expertos y obtener respuestas a sus preguntas.

3.2. Normatividad y regulación

3.2.1. Normativas internacionales

Están diseñadas para proteger la salud pública y asegurar que las exposiciones a los campos ELF sean seguras. La ICNIRP es la principal entidad que establece directrices globales sobre la exposición a tales campos, basadas en revisiones de la literatura científica y diseñadas para proteger a todas las personas, incluidos los trabajadores y el público en general.

1. *Directrices de ICNIRP.* Establecen límites de exposición para diferentes frecuencias de los campos electromagnéticos. Estos límites están divididos en dos categorías principales: exposición ocupacional y exposición del público en general. Los límites ocupacionales son más altos debido a que están destinados a trabajadores que pueden estar expuestos durante períodos prolongados, pero en entornos controlados. Las directrices son ampliamente adoptadas por muchos países como la base para sus propias normativas nacionales.
2. *OMS.* También juega un papel importante en la regulación de las ELF. A través de su Proyecto Internacional sobre Campos Electromagnéticos, colabora con gobiernos y organizaciones científicas en la evaluación de los riesgos para la salud asociados con tales campos y el desarrollo de políticas públicas que minimicen esos riesgos. Además, la OMS apoya las directrices de ICNIRP y promueve su adopción global.

3.2.2. Regulaciones nacionales

Las regulaciones específicas sobre las ELF varían de un país a otro, aunque muchas naciones basan sus normativas en las directrices de ICNIRP. A continuación se presenta una comparación de las regulaciones en varios países:

1. *España.* La normativa sobre ELF está alineada con las directrices de ICNIRP. El Real Decreto 1066/2001 establece los límites de exposición para campos eléctricos y magnéticos, tanto para la población en general como para los trabajadores. La REE cumple estos límites para garantizar la seguridad de sus infraestructuras, realiza mediciones regulares y publica los resultados para asegurar la transparencia y el cumplimiento de estas normativas.
2. *Francia.* También adopta las directrices de ICNIRP, pero con medidas adicionales para la supervisión y el monitoreo de la exposición a ELF. La ANFR es la encargada de regular y monitorear la exposición a campos electromagnéticos. Para ello, utiliza herramientas como Cartoradio, que proporciona información detallada sobre la ubicación de infraestructuras radioeléctricas y las mediciones de exposición en todo el país. Esta transparencia permite a los ciudadanos acceder a datos precisos sobre su exposición a tales campos.
3. *Estados Unidos.* La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) y la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) son las entidades responsables de regular la exposición a las ELF. Las directrices de ICNIRP son adoptadas y adaptadas a través de normativas específicas que establecen límites de exposición para diferentes escenarios. SCE se ciñe a estos límites y realiza estudios adicionales para asegurar que sus operaciones cumplan con las normativas de seguridad [29].
4. *Canadá.* Health Canada es la entidad que regula la exposición a las ELF. Las directrices de exposición están basadas en los límites de ICNIRP y son implementadas a través de normativas nacionales. Hydro-Québec cumple con estas regulaciones y financia investigaciones para evaluar y mitigar los posibles efectos de los campos ELF en la salud y el medio ambiente.
5. *Japón.* El Ministerio de Asuntos Internos y Comunicaciones (MIC) regula la exposición a los campos ELF, siguiendo las directrices de

ICNIRP. El Japan EMF Information Center colabora con el MIC para proporcionar información y educar al público sobre dichos campos y las normativas de seguridad asociadas. Japón también participa en proyectos internacionales para mejorar la regulación y gestión de los campos electromagnéticos [30].

6. *Corea del Sur.* Los límites de exposición pública o laboral a los campos ELF son definidos por el Ministerio de Ciencia y TIC (MSIT), el Instituto de Investigación de Radiocomunicaciones de Corea (KCA) y el Ministerio de Salud y Bienestar (MOHW). Estas entidades colaboran para establecer normas y directrices basadas en estándares internacionales y en investigaciones científicas, con el objeto de proteger a la población y a los trabajadores de los posibles efectos nocivos de la exposición a los campos electromagnéticos [31].
7. *Irlanda.* EirGrid, el operador de la red de transmisión eléctrica sigue las directrices de ICNIRP para regular la exposición a las ELF. Las normativas nacionales están diseñadas para proteger tanto al público en general como a los trabajadores. EirGrid implementa programas educativos y de concienciación para asegurar que el público esté informado sobre las normativas y los niveles de exposición [32].
8. *Rusia.* Los límites de exposición pública o laboral a los campos ELF son definidos por el Servicio Federal de Supervisión de la Protección de los Derechos del Consumidor y el Bienestar Humano (Rospotrebnadzor), en colaboración con el Ministerio de Salud de la Federación Rusa y el Comité Nacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes. Estas instituciones establecen las normas sanitarias y recomendaciones basándose en estándares nacionales e internacionales para proteger la salud pública y laboral frente a la exposición a campos electromagnéticos [33-35].
9. *Colombia.* En el título 11 del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (Retie), para el 2024, se presentan los límites de exposición a campos ELF y se establecen los lineamientos para realizar mediciones de campos eléctricos y magnéticos.

Para el caso de los límites de exposición, según del artículo 3.11.1 del Retie, las personas expuestas a campos electromagnéticos (ya sea por actividades laborales u ocupacionales) y el público en general no deben estar sometidos a

campos que superen ciertos valores establecidos. Los valores límite varían según la intensidad del campo eléctrico y la densidad de flujo magnético.

En cuanto a la medición de campos electromagnéticos, el Retie establece que, durante la certificación de conformidad de las instalaciones eléctricas, se deben medir los valores de campo eléctrico y densidad de flujo magnético en áreas con presencia de personas. Las mediciones se realizan a una altura de un metro sobre el piso y se pueden utilizar métodos como IEEE 644 o IEEE 1243. Para líneas de transmisión, las mediciones se toman en la zona de servidumbre, en sentido transversal al eje de la línea. Y en subestaciones, se deben medir los campos internos y externos, siguiendo umbrales específicos.

Es importante resaltar que, para edificaciones destinadas a industria, comercio, vivienda u oficinas, se verifica la densidad de flujo magnético cerca de conductores con capacidad nominal mayor o igual a 1000 A. Si el valor medido supera el umbral de exposición al público, se deben tomar medidas para restringir la presencia de personas [36].

3.2.3. Cumplimiento y supervisión

Asegurar el cumplimiento de las normativas sobre las ELF es crucial para proteger la salud pública y mantener la confianza del público en las autoridades reguladoras y las empresas de servicios eléctricos. Los mecanismos de cumplimiento y supervisión varían entre los diferentes países, pero generalmente incluyen los siguientes elementos:

1. *Monitoreo y mediciones regulares.* Las empresas y organismos reguladores realizan mediciones regulares de los campos eléctricos y magnéticos para asegurar que los niveles de exposición estén dentro de los límites establecidos por las normativas. Por ejemplo, REE y RTE realizan monitoreos continuos de sus infraestructuras eléctricas y publican los resultados para garantizar la transparencia.
2. *Auditorías y evaluaciones.* Las auditorías periódicas y las evaluaciones de cumplimiento son esenciales para asegurar que las empresas sigan las normativas de seguridad. Pueden ser realizadas por organismos reguladores o por terceros independientes. Hydro-Québec, por ejemplo, participa en auditorías regulares para evaluar el cumplimiento de las normativas sobre ELF [37].

3. *Informes de cumplimiento.* Las empresas deben proporcionar informes regulares sobre sus prácticas de gestión de las ELF y los resultados de sus mediciones. Estos informes son revisados por los organismos reguladores para asegurar que las empresas cumplan con las normativas. EirGrid, por ejemplo, proporciona informes detallados sobre sus actividades de monitoreo y cumplimiento a las autoridades reguladoras en Irlanda.
4. *Plataformas de transparencia.* El acceso público a la información sobre los niveles de exposición a ELF es fundamental para mantener la confianza del público. Herramientas como EMF Around You, de EPRI, y Cartoradio, de ANFR, permiten a los ciudadanos acceder a datos detallados sobre la exposición a campos electromagnéticos en sus áreas. Estas plataformas de transparencia son esenciales para que el público pueda tomar decisiones informadas sobre su exposición.
5. *Educación y concienciación.* Son componentes clave del cumplimiento de las normativas. Los programas educativos y las campañas de sensibilización ayudan a informar al público sobre los riesgos potenciales de las ELF y las medidas de seguridad que se están implementando. Los recursos educativos proporcionados por REE, Hydro-Québec y el Japan EMF Information Center son ejemplos de cómo se puede aumentar la conciencia pública y asegurar el cumplimiento de las normativas [31].

Varios agentes internacionales desempeñan un papel crucial en la gestión, investigación y divulgación de información sobre los campos ELF. Entre estos se encuentran REE (España), Hydro-Québec (Canadá), RTE y ANFR (Francia), SCE y EPRI (EE. UU.), EirGrid (Irlanda) y el Japan EMF Information Center. Aunque varían en su enfoque y jurisdicción, dichos agentes comparten el objetivo común de proporcionar información transparente y accesible al público sobre las ELF.

La REE y RTE proporcionan datos detallados sobre los campos eléctricos y magnéticos generados por sus infraestructuras, ofreciendo estudios epidemiológicos y biofísicos que garantizan la seguridad de estos campos. Ambos agentes siguen normativas internacionales, como las directrices de la ICNIRP, y publican sus hallazgos para mantener la transparencia con el público. Similarmente, Hydro-Québec y SCE realizan y financian investigaciones extensivas sobre los efectos de las ELF, y comparten sus resultados a través de informes y

plataformas en línea para tranquilizar y educar al público sobre la seguridad de los correspondientes campos.

EirGrid y el Japan EMF Information Center, por su parte, adoptan un enfoque educativo robusto, proporcionando folletos, sitios web y recursos interactivos para aumentar la conciencia pública sobre las ELF y sus posibles impactos en la salud. EPRI, con su herramienta EMF Around You, ofrece una plataforma interactiva que permite al público explorar los niveles de exposición a campos magnéticos y eléctricos en diferentes entornos, proporcionando datos accesibles y detallados.

Por otro lado, ANFR destaca por su herramienta Cartoradio, que permite a los usuarios acceder a mapas detallados sobre la ubicación de sitios radioeléctricos y mediciones de exposición a ondas en todo el territorio francés. Esta plataforma ofrece un nivel de transparencia y accesibilidad único, con lo cual empodera a los usuarios para tomar decisiones informadas sobre su exposición a las ELF [38].

Capítulo 4. Frecuencias extremadamente bajas y salud: un enfoque integral



FIGURA 8. Enfoque integral con respecto a las frecuencias extremadamente bajas y la salud

Fuente: generada mediante ChatGPT-Dall E, 2024.

4.1. Las frecuencias extremadamente bajas y la salud

En esta nueva era tecnológica, los equipos como celulares, computadores, televisores, radios y electrodomésticos se hacen imprescindibles para la vida diaria de todo ser humano. Por otra parte, todos esos aparatos generan una

alta demanda de electricidad y cada dispositivo o fuente artificial produce un campo electromagnético, lo que crea una nueva realidad para los ciudadanos: hay campos electromagnéticos en la vivienda y en el trabajo, pero en general son imperceptibles [39].

En el cuerpo humano se producen corrientes eléctricas minúsculas debidas a las reacciones químicas de las funciones corporales normales, incluso en ausencia de campos eléctricos externos. Sin embargo, surge la siguiente inquietud: cuando la exposición a estos campos externos aumenta, ¿hay algún efecto en nuestra salud? La respuesta corta es que la literatura no ha demostrado una asociación clara entre las ELF y la salud humana [40].

En este capítulo se expone la información disponible a nivel Colombia, específicamente de Bogotá, sobre los efectos en salud de los campos electromagnéticos. Insistimos en que, aunque no existe asociación, debe prevalecer el principio de precaución, explicado más adelante en este capítulo [41].

4.2. Efectos en la salud

En esta sección se desglosan las dos categorías más importantes de los efectos en salud ocasionados por la radiación no ionizante.

4.2.1. Efectos directos

Resultan de interacciones directas de los campos con el cuerpo. Por ejemplo, la estimulación de tejidos nerviosos centrales y periféricos, la inducción de fosfeno en la retina, efectos de carga eléctrica en la piel, sensación de hormigueo y cefalea [39].

4.2.2. Efectos indirectos

Involucran interacciones con un objeto conductor cuyo potencial eléctrico es diferente al del cuerpo, como corrientes inducidas en este por contacto con objetos conductores en un campo eléctrico [39].

4.3. Normatividad

A nivel internacional existen tres entidades que regulan la radiación:

- *Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA)*. Publica las “Normas básicas internacionales de seguridad” para proteger a las personas y el medio ambiente de la radiación ionizante [42].
- *Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP)*. Recomienda límites de exposición a radiaciones ionizantes [43].
- *Comisión Internacional para la Protección de la Radiación No Ionizante (ICNIRP)*. Establece límites para campos electromagnéticos [44].

En Colombia se han expedido normas de carácter jurídico-técnico dirigidas a la protección ambiental: el Código Nacional de Recursos Naturales (Decreto 2811 de 1974), la Ley 99 de 1993 y la Ley 388 de 1997 (Ley de Desarrollo Territorial), que han ratificado el derecho a un ambiente sano y promovido el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes. El Decreto 195 del 2005, por su parte, establece los límites de exposición de las personas a campos electromagnéticos.

Además, la Ley 1341 del 2009 crea la Agencia Nacional del Espectro (ANE), que brinda atención al Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en cuanto a la planeación, la vigilancia y el control del espectro radioeléctrico. El Decreto 397 del 2017, a su vez, implementa normas urbanísticas, arquitectónicas y técnicas para la localización e instalación de estaciones radioeléctricas [45].

Adicionalmente, la ANE busca hacer prevalecer la Ley 99 de 1993, en la que se estableció que debe aplicarse el principio de precaución cuando “exista peligro de daño grave e irreversible, la falta de certeza científica absoluta no deberá utilizarse para postergar medidas eficaces para impedir la degradación del medio ambiente”. Ahora bien, tal aplicación no solo pretende proteger el ambiente, sino también evitar daños a la salud, en conjunto con la Sentencia T-360 del 2010 de la Corte Constitucional (“A falta de certeza científica, debe ser aplicado el principio de precaución”) y la Sentencia T-1077 del 2012 de esa misma corte (“Aplicación del principio de precaución en la jurisprudencia constitucional para el caso de la radiación”) [45].

La Resolución 774 del 2018, por su parte, establece las mediciones en sitio para acreditar el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a

campos electromagnéticos, e implementa los avisos de señalización que informan sobre dichos límites [45].

Se puede concluir que, aunque científicamente no existe relación directa entre la radiación no ionizante y sus efectos en la salud de las personas, el gobierno nacional ha implementado diferentes normativas para preservar el principio de precaución explicado y limitar al mínimo la interacción entre ciudadanía y radiación no ionizante.

La ANE, en alianza estratégica con el Ministerio de Salud y Protección Social, está trabajando en el diseño e implementación de una estrategia que permita orientar la gestión de las entidades territoriales de salud con base en la evidencia disponible sobre afectación de salud asociada a la exposición a campos electromagnéticos. Adicionalmente, en mayo del 2020 la ANE participó en la Comisión de Estudio 5 de la UIT-T y actualizó la “Guía de campos electromagnéticos y salud (suplemento 1, UIT-K.91)” con los últimos documentos de la OMS y los nuevos límites indicados por el ICNIRP en el 2020. También incorporó la guía 5G.

El Sistema de Monitoreo Continuo de Campos Electromagnéticos de la ANE fue incluido como ejemplo modelo en el anexo de la Recomendación UIT-T K.83. Asimismo, la ANE revisó la evaluación de cumplimiento de los límites de campos electromagnéticos de nuevos tipos de estaciones, como las que se instalan bajo tierra, y aconsejó a las administraciones estudiar la adopción de los nuevos límites de campos electromagnéticos recomendados por el ICNIRP en el 2020.

4.4. Vigilancia de aire, ruido y radiación electromagnética

La Secretaría Distrital de Salud, por medio de la Línea de Aire, Ruido y Radiación Electromagnética, realiza la vigilancia en salud ambiental de la contaminación electromagnética no ionizante, la cual es un subproducto de la generación, transmisión y distribución de los campos magnéticos y eléctricos generados por las actividades domésticas, laborales, industriales y de comunicación. En ese marco se desarrollan procesos para orientar el diseño de estrategias e intervenciones para mitigar los efectos nocivos asociados a este factor de riesgo [45].

4.4.1. Componente ambiental

Contempla la atención de quejas de la comunidad sobre la ubicación de infraestructuras eléctricas y de comunicaciones que emiten radiaciones electromagnéticas, para identificar posible sintomatologías relacionadas con dicha exposición [46].

4.4.2. Componente de salud

Para realizar el seguimiento continuo y sistemático de los eventos en salud asociados a la exposición a radiación electromagnética en la población, se analiza la información recogida a partir de fuentes primarias: encuestas de percepción aplicadas a adultos de 18 a 55 años, identificando factores de riesgo por la exposición a infraestructuras eléctricas aledañas al lugar de residencia y por uso de dispositivos electrónicos [46].

4.4.2.1. Tipos de vigilancia epidemiológica de la relación entre radiación no ionizante y salud

1. *Vigilancia de primera generación.* Se enfoca en la morbilidad y mortalidad con base en datos públicos provenientes de las bases de datos del Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica (Sivigila), Estadísticas Vitales, del Departamento Administrativo Nacional de Estadística, (DANE), el Registro Individual de Prestación de Servicios (RIPS) y el Sistema de Información de Protección Social (Sispro). También incluye el análisis de datos ambientales en matriz aire, agua y suelos, provenientes de bases de datos del Sistema de Información Ambiental (SIA), e información de epidemiología ambiental, que en el caso de Bogotá es reportada por Saludata [47].
2. *Vigilancia de segunda generación.* Se refiere al monitoreo ambiental de radiación electromagnética no ionizante, el cual puede ser ambiental, de ambientes construidos y de nube de exposición personal o *exposoma*. Se puede caracterizar la exposición a través del análisis geoestadístico y la utilización de perfiles de exposición. Se puede incluir la vigilancia de quejas y rumores [47].
3. *Vigilancia de tercera generación.* Biomonitoring y ciencias ómicas [47].

4. *Vigilancia cualitativa-etnográfica.* Integración del componente intercultural, la cartografía social y la vigilancia comunitaria de radiación electromagnética y salud [47].

4.5. Vigilancia en salud ambiental de los posibles efectos por exposición a radiación electromagnética

Para realizar la vigilancia de los efectos en salud por exposición a radiaciones electromagnéticas se consideran dos aspectos importantes: 1) el seguimiento a los posibles efectos en salud entre la población por la exposición a radiaciones electromagnéticas no ionizantes y 2) la verificación ambiental de la cercanía de fuentes a población vulnerable agrupada en sitios como centros de atención hospitalaria, instituciones educativas y hogares geriátricos [45].

Para esta vigilancia se siguen los posibles efectos en salud entre la población por exposición a radiaciones electromagnéticas no ionizantes, mediante la prevalencia de síntomas no específicos que podrían configurar el *síndrome de radiofrecuencia*. Este seguimiento se realiza por medio del Sistema de Quejas y Derechos de Petición y mediante la realización de encuestas de percepción a la ciudadanía entre los 18 y los 65 años cuyo tiempo de residencia en la unidad habitacional seleccionada sea mayor a cinco años, para definir un tiempo de riesgo [45].

4.6. Percepción de síntomas no específicos por radiación electromagnética

Los actores gubernamentales, entre ellos la Secretaría Distrital de Salud de Bogotá, además de la revisión del Sistema de Quejas y Derechos de Petición, realizan encuestas de percepción a la ciudadanía. Esto y la corroboración de cifras reportadas en las diferentes ventanas de información permiten a las entidades elaborar informes de caracterización [45].

Para el 2019, en Bogotá, se realizó un informe anual utilizando la caracterización de 1409 personas. Los síntomas más frecuentes fueron: cefalea, con 44 %, seguida de alteración del sueño, con 23,7 %, e irritabilidad, con 22,1 %. Al hacer un análisis por periodicidad de presentación de los síntomas,

se observó que la alteración visual fue la más común, percibida en 10,2 % del total de la población, seguida de la cefalea, con un 8,2 % y alteración del sueño, con un 6,8 %. Al evaluar la periodicidad semanal, la de mayor frecuencia fue la cefalea, con un 10,2 %, seguida de alteración del sueño, con un 5,8 % [48].

En el primer trimestre del 2020 se aplicaron 379 encuestas de percepción de síntomas no específicos por radiación electromagnética, en las que predominó el género femenino, con 266 mujeres (70 %). En promedio los encuestados han habitado en la vivienda alrededor de diecinueve años, en promedio cuatro personas en cada vivienda, y permanecen alrededor de 6,9 días allí [45]. Para esta vigilancia se analiza el *síndrome de radiofrecuencia*, que se define como la presentación de ocho o más síntomas consultados entre los encuestados. En este primer trimestre se identifica que el dolor de cabeza, las alteraciones visuales y la fatiga fueron los más frecuentes. También se identifica una amplia gama de síntomas muy variados y diferentes [45].

4.6.1. Fuentes de información: Observatorio de Salud de Bogotá

Para esta ventana de información, los datos se reportan a través de la frecuencia y la tendencia anual de la exposición a radiaciones no ionizantes [48].

La exposición aumenta exponencialmente a medida que se incrementan los dispositivos inalámbricos y electrónicos, y las infraestructuras de telefonía móvil. Este indicador es el resultado de la aplicación de encuestas para evaluar síntomas no específicos de posible afectación a la salud por campos electromagnéticos.

Los factores relacionados con radiaciones no ionizantes en las personas caracterizadas son residir a menos de 200 metros de una antena de telefonía móvil, entre 200 y 400 metros de la misma fuente, cerca de transformadores eléctricos o a menos de 10 metros de líneas eléctricas [48].

En cuanto a la posible relación con el síndrome de radiofrecuencia, se encontró que residir entre 200 y 400 metros de una antena de telefonía móvil aumenta el síndrome en comparación con hacerlo fuera de esta área.

La información del uso de dispositivos electrónicos en personas caracterizadas de Bogotá se obtuvo del 2018 al 2022, encuestando 10 909 personas, 487 de las cuales manifestaron usar cinco o más equipos electrónicos o electrodomésticos diariamente [48].

Para el 2022, el 3,6 % (97/2680) de las personas caracterizadas manifestó utilizar cinco o más equipos o electrodomésticos diariamente. Los más utilizados fueron el teléfono móvil, el wifi y el televisor, que en conjunto representan el 87,5 %. En cuanto al comportamiento por localidad, Teusaquillo, Barrios Unidos, Suba y Chapinero presentaron mayor frecuencia de uso de dispositivos [48].

En cuanto a la posible relación con los síntomas consultados entre los encuestados, se encontró que la exposición diaria a cinco o más dispositivos electrónicos aumenta la presentación de alteración visual y problemas de piel en comparación con las personas que no se exponen con la misma frecuencia a tales dispositivos [48].

4.6.2. Fuentes de información: Subdirección de Vigilancia en Salud Pública

Según la Subdirección de Vigilancia en Salud Pública de la Secretaría Distrital de Salud, en el 2019, con base en reportes de la ciudadanía, 7 de los 18 síntomas más frecuentemente relacionados con la radiación electromagnética y el síndrome de radiofrecuencia son la cefalea (1098), las alteraciones visuales (679), la irritabilidad (675), la alteración del sueño (668), la fatiga (631), la sensación de hormigueo/calor (483) y la dificultad para concentrarse (454) [48].

En cuanto a los posibles factores relacionados con el síndrome de radiofrecuencia, se dividen en tres categorías:

- *Cercanía a infraestructuras eléctricas.* Personas expuestas: a líneas eléctricas, 90; a transformadores, 25; a antenas de radio y tv, 9; a torres de alta tensión, 2, y a subestaciones, 1.
Personas menos expuestas: a subestaciones, 113; a torres de alta tensión, 112; a antenas de radio y tv, 105; a transformadores, 99, y a líneas eléctricas, 24 [48].
- *Uso de electrodomésticos.* Personas expuestas: utilizan celular, 109; usan televisor, 100; usan wifi, 92; usan computador, 49; sobreexposición a dispositivos electrodomésticos, 8.
Personas menos expuestas: sobreexposición a dispositivos electrodomésticos, 106; usan computador, 65; usan wifi, 22; usan televisor, 14; utilizan celular, 5 [48].

- *Otros factores posiblemente relacionados.* Personas expuestas: estado de salud, 74; presentan enfermedad, 64; consumo de medicamentos en el último mes, 58; familiar con cáncer, 39; fuman, 13. Personas menos expuestas: fuman, 101; familiar con cáncer, 75; consumo de medicamentos en el último mes, 56; presentan enfermedad, 50; estado de salud, 4 [48].

4.6.3. Reporte en el sistema de salud según patologías asociadas

Para analizar las patologías relacionadas con exposición a radiación no ionizante se consideraron los siguientes diagnósticos según la Clasificación Internacional de Enfermedades CIE-10 (10.^a edición).

TABLA 1. Enfoque integral con respecto a las frecuencias extremadamente bajas y la salud

Código	Evento
L57	Cambios de la piel por exposición crónica no ionizante
L58	Radiodermatitis crónica por exposición no ionizante
T66	Efectos no específicos por radiación
W85	Exposición línea de transmisión eléctrica
W90	Exposición a otros tipos de radiación no ionizante
W91	Exposición a radiación de tipo no especificado

Fuente: [48].

4.7. Experiencias internacionales

- *Legislación Serbia sobre campos electromagnéticos.* Se discute la necesidad de armonizar la legislación nacional con las recomendaciones de la ICNIRP 2020, actualizando los actos legislativos más importantes y los límites de exposición a la radiación de campos electromagnéticos [49]. La Ley sobre la Protección contra la Radiación No Ionizante (*Boletín Oficial RS*, n.^o 36/09) establece medidas y condiciones para proteger la salud humana y el medio ambiente de los efectos nocivos de la radiación no ionizante [49].

Monitoreo e informes. Los programas de prueba sistemática de los niveles de radiación no ionizante son preparados por el Ministerio de Salud y Medio Ambiente en colaboración con la autoridad competente del país, financiados por el Estado [49].

Los informes anuales sobre los resultados de las pruebas deben ser presentados a la autoridad competente antes del 31 de marzo del año siguiente. Se requiere un informe inmediato en caso de eventos extraordinarios [49].

Las herramientas para medir la exposición a campos electromagnéticos de radiofrecuencia (RM-EMF) en Serbia han evolucionado significativamente desde estudios anteriores [50]. Herramientas basadas en teléfonos móviles: las aplicaciones modernas, como XMobiSense y ElectroSmart, permiten una evaluación más precisa y en tiempo real del uso del teléfono móvil y la exposición a RM-EMF, superando los métodos subjetivos anteriores, basados en cuestionarios [50].

Exposímetros portátiles: dispositivos como ExpoM-RF 4 y EME Evolution ofrecen mediciones más detalladas y en una gama más amplia de frecuencias, incluyendo las bandas utilizadas por tecnologías 5G, lo cual no era posible con las versiones anteriores [50].

Herramientas de monitoreo ambiental: sistemas como SRM-3006 y RFeye proporcionan una monitorización ambiental más extensa y pueden evaluar la exposición en áreas geográficas más grandes con mayor precisión [50].

- *Francia.* El sistema de control y monitoreo de campos electromagnéticos en Francia incluye mediciones en múltiples ubicaciones y se basa en consultas públicas para determinar puntos críticos de monitoreo [47].
- *Italia y Chipre.* Publican resultados de encuestas de monitoreo anuales en línea, permitiendo el acceso público a la información sobre niveles de EMF cerca de infraestructuras eléctricas [47].
- Una revisión sobre el estado de las actividades de monitoreo de la exposición a campos electromagnéticos en Europa concluye:
 - Solo Chipre, Hungría y Eslovenia realizan encuestas anuales con un gran tamaño de muestra.
 - Austria, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Países Bajos, Noruega, Eslovaquia, Suiza y Reino Unido realizan encuestas *ad hoc* con tamaños de muestra pequeños [47].

- Tras una búsqueda específica en una selección de países europeos se identificó que actualmente existen programas de monitoreo en curso en Irlanda, Alemania y Suiza, cuyo objetivo es evaluar la exposición a radiación de campos electromagnéticos entre la población en general [47].

4.8. Recomendaciones

Mediante campañas de comunicación y difusión, los actores involucrados (relacionados con los ministerios de Gobierno, Salud y Ambiente) envían recomendaciones a la ciudadanía sobre los efectos en salud por exposición a radiación como las descritas a continuación:

- Promover el uso racional de los teléfonos móviles y limitarlo entre la población sensible, como niños, adolescentes y personas con prótesis metálicas, implantes cocleares, marcapasos y desfibriladores cardíacos, para reducir la exposición innecesaria a los campos electromagnéticos.
- Fomentar el uso de sistemas “manos libres” o mensajes de texto para las personas que por sus actividades diarias requieren de un mayor uso de la telefonía móvil, con el fin de mantener el equipo alejado de la cabeza durante la transmisión.
- Los aparatos eléctricos generan campos electromagnéticos de intensidades diferentes, los cuales disminuyen rápidamente en función de la distancia de uso. Por ejemplo: horno microondas, televisor, wifi.

4.8.1. Participación de la comunidad en la toma de decisiones relativas a la colocación de antenas de radiodifusión y líneas de transmisión eléctrica

Estos procesos ayudan a construir confianza, aumentar la transparencia y asegurar que las preocupaciones del público sean consideradas en el desarrollo de infraestructuras que generan campos electromagnéticos [51]:

- Organizar audiencias públicas en las que los ciudadanos puedan expresar sus preocupaciones y hacer preguntas a los expertos y a los responsables de la toma de decisiones.
- Distribuir encuestas y cuestionarios para recopilar opiniones y preocupaciones sobre la ubicación de antenas y líneas de transmisión.
- Realizar talleres y seminarios informativos para educar al público sobre los riesgos y beneficios de los campos electromagnéticos y las medidas de mitigación.
- Crear sitios web y plataformas en línea dedicados, donde se publique información actualizada, documentos relevantes y se ofrezcan foros para comentarios públicos [51].

4.8.2. Percepción del riesgo

La percepción del riesgo asociada con los campos electromagnéticos (CEM) puede variar considerablemente entre diferentes segmentos de la sociedad, influenciada por factores culturales, educativos y la exposición previa a la información disponible. Esta variabilidad en la percepción es fundamental a la hora de gestionar la exposición a los CEM, especialmente en un contexto de creciente urbanización y dependencia tecnológica. Por lo tanto, abordar eficazmente estas percepciones es crucial para garantizar una adecuada comprensión y aceptación de las políticas y regulaciones sobre los CEM.

Con ello en mente, se deben implementar estrategias claras y eficaces en la comunicación de los riesgos, las cuales pueden abarcar las siguientes características clave:

- *Comunicación clara y coherente.* Es esencial utilizar un lenguaje accesible y sencillo, evitando el uso de terminología técnica compleja que pueda generar confusión o desconfianza entre la población. La información sobre los posibles riesgos y las medidas de seguridad asociadas a la exposición a los CEM debe ser presentada de forma clara y comprensible, para que cualquier individuo, independientemente de su nivel educativo, pueda asimilarla y actuar en consecuencia. Esto no solo facilita la comprensión, sino que también ayuda a reducir la ansiedad asociada a la exposición a estos campos [52].

- *Participación de expertos.* Involucrar científicos, investigadores y expertos en salud pública es fundamental para proporcionar una perspectiva equilibrada y basada en evidencia sobre los riesgos de los CEM. Los expertos deben ser consultados para proporcionar datos científicos sólidos que respalden las recomendaciones sobre límites de exposición y las medidas preventivas necesarias para proteger la salud pública. Esta participación ayuda a construir confianza y credibilidad, lo cual permite que la información difundida se perciba como imparcial y bien fundamentada. Además, su intervención en el proceso de toma de decisiones es crucial para la elaboración de políticas públicas efectivas en este ámbito [53].
- *Respuesta a preocupaciones.* Es importante responder de manera directa y respetuosa a las preocupaciones y preguntas que el público pueda tener respecto a los CEM. Un enfoque proactivo que implique una comunicación bidireccional, en la que se escuchen y atiendan las dudas de la población, es esencial para fomentar el entendimiento mutuo y la cooperación. Las respuestas deben ser fundamentadas en estudios científicos y presentadas de manera empática, para así aliviar la incertidumbre y proporcionar seguridad en cuanto a la gestión de los CEM [54].
- *Nuevos abordajes del monitoreo de radiación y salud a partir determinantes sociales y ambientales.* En la actualidad, se requieren enfoques integrales y multidisciplinarios para el monitoreo de la exposición a los CEM, que consideren no solo los aspectos técnicos y científicos, sino también los determinantes sociales y ambientales que pueden influir en la exposición de distintos grupos poblacionales. Estos factores incluyen el acceso a tecnología, las condiciones de vida en áreas urbanas densamente pobladas y las diferencias socioeconómicas que pueden afectar la vulnerabilidad a los riesgos asociados a los CEM. Además, es crucial establecer mecanismos de monitoreo en tiempo real para identificar áreas con niveles elevados de exposición y tomar medidas correctivas de manera oportuna.

De este modo, la gestión de los riesgos asociados a los CEM debe basarse en una comunicación efectiva, el compromiso de los expertos y la atención a las preocupaciones de la población. Se han de incorporar enfoques innovadores y basados en la evidencia para garantizar que se tomen decisiones fundamentadas que protejan tanto la salud pública como el medio ambiente.

4.8.3. Ejemplos de política pública implementados en Bogotá

El protocolo de vigilancia epidemiológica ambiental de Bogotá incluye la vigilancia de la radiación electromagnética como parte de la línea estratégica de Aire, Ruido y Radiación Electromagnética (Arrem) [55]. En términos específicos:

1. Vigilancia Ambiental Rutinaria y Centinela:
 - a. Realiza seguimiento a los efectos en salud asociados con la exposición a radiaciones no ionizantes (REM) en personas de 18 a 55 años.
 - b. Recopila y analiza información primaria y secundaria, incluidas encuestas de prevalencia de síntomas relacionados con REM.
 - c. Incluye la caracterización de factores de riesgo y verificación del cumplimiento de normativas, como espacios libres de humo y aerosoles.
2. Gestión de Conocimiento y Capacidades:
 - a. Desarrolla investigaciones sobre efectos emergentes relacionados con REM.
 - b. Publica los resultados obtenidos en plataformas y boletines, y los divulga a través de diferentes medios para informar y sensibilizar.
3. Monitoreo y Evaluación:
 - a. Genera información sobre los impactos potenciales de las REM en la salud y orienta la creación de estrategias preventivas y de gestión.
4. Actividades y Productos:
 - a. Publica documentos y estudios que evidencian los efectos en salud de las REM, el análisis de carga de enfermedad y el diseño de herramientas para monitoreo y control.

Estas acciones buscan disminuir la exposición a radiación electromagnética y mitigar sus posibles impactos negativos en la salud de la población, dentro del marco del Plan Territorial de Salud 2024-2027 [55].

Capítulo 5. Oportunidades y desafíos en la gestión de campos de frecuencias extremadamente bajas en ciudades hiperurbanizadas

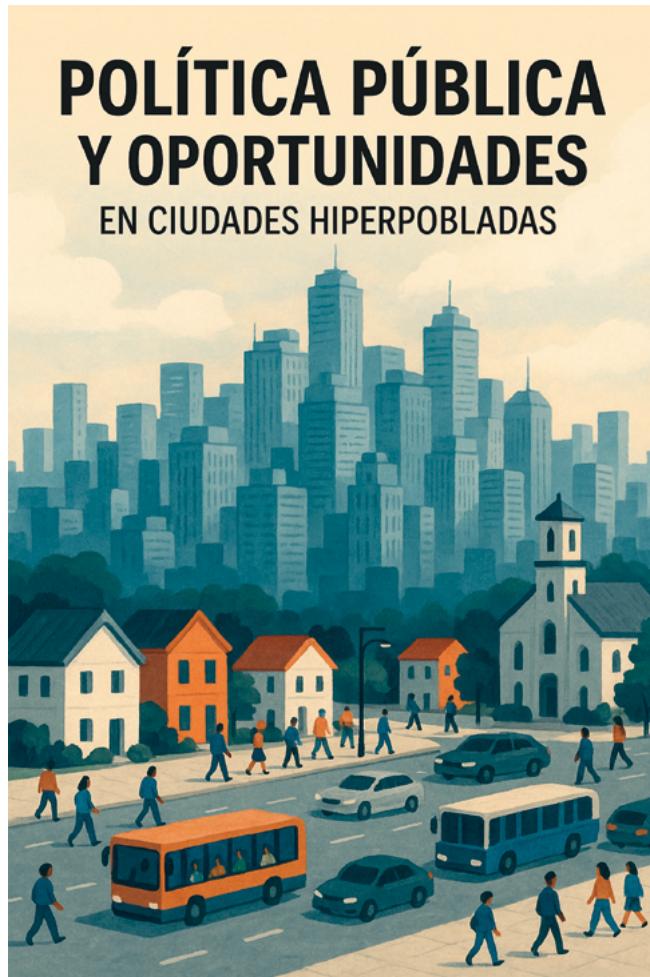


FIGURA 9. Política pública y oportunidades en ciudades hiperpobladas

Fuente: generada mediante ChatGPT-Dall E, 2024.

5.1. Desafíos en la gestión de los campos de frecuencias extremadamente bajas

La gestión y divulgación de información sobre los campos ELF involucra una variedad de enfoques y recursos, desde programas educativos y herramientas interactivas hasta regulaciones y políticas específicas. A medida que la sociedad avanza hacia una mayor dependencia de la tecnología, es fundamental que los

países y organizaciones continúen colaborando con la investigación, la regulación y la educación pública para garantizar entornos seguros y saludables frente a la exposición a ELF.

En un mundo cada vez más interconectado y dependiente de la tecnología, la gestión de los campos ELF se ha convertido en un desafío crucial para la salud pública y el medio ambiente. A medida que la infraestructura eléctrica y electrónica continúa expandiéndose, surgen preocupaciones sobre los posibles efectos adversos de la exposición a campos electromagnéticos en la salud humana y la biodiversidad. En este contexto, diversos países y organizaciones están intensificando sus esfuerzos para comprender y abordar los riesgos asociados con las ELF, así como para educar al público sobre estos temas.

Uno de los enfoques clave adoptados por muchas naciones es la investigación y evaluación de los posibles efectos de las ELF en la salud humana y el medio ambiente. Se están llevando a cabo estudios epidemiológicos y experimentales para analizar la relación entre la exposición a campos electromagnéticos y el desarrollo de enfermedades como cáncer, trastornos neurológicos y problemas de salud reproductiva. Además, se están realizando investigaciones para evaluar los impactos de las ELF en la vida silvestre, incluidos los efectos sobre la orientación y migración de aves, la reproducción de mamíferos marinos y la salud de los ecosistemas acuáticos. Estos esfuerzos de investigación son fundamentales para enriquecer la formulación de políticas y garantizar regulaciones efectivas destinadas a proteger la salud pública y el medio ambiente de los posibles riesgos de las ELF.

En paralelo a la investigación científica, muchas organizaciones están desarrollando programas de educación pública para aumentar la conciencia y comprensión de las ELF entre la población en general. Se están creando recursos educativos, como folletos, videos y sitios web, que explican de manera clara y accesible qué son los campos electromagnéticos, cómo se generan y cuáles pueden ser sus efectos en la salud humana y el medio ambiente. Estos materiales educativos también ofrecen consejos prácticos sobre cómo reducir la exposición a las ELF en la vida cotidiana mediante el uso adecuado de dispositivos electrónicos y la ubicación segura de antenas de radio y líneas eléctricas.

5.2. Políticas, regulaciones y cooperación internacional en la gestión de frecuencias extremadamente bajas

Además de la investigación y la educación públicas, la regulación y las políticas juegan un papel crucial en la gestión de las ELF. Muchos países han establecido límites de exposición a campos electromagnéticos basados en recomendaciones de organizaciones internacionales como la ICNIRP y la OMS. Estos límites están diseñados para proteger la salud de los ciudadanos y garantizar que la exposición a las ELF esté dentro de niveles seguros. Además, se están implementando medidas de control ambiental para reducir la emisión de campos electromagnéticos en áreas sensibles, como escuelas, hospitales y parques naturales.

La gestión de los campos electromagnéticos en las ciudades hiperpobladas es aún más crítica debido a la alta concentración de fuentes de ELF. En estos entornos urbanos, donde las infraestructuras eléctricas son densas y las fuentes de radiación electromagnética están dispersas por todo el espacio, las preocupaciones sobre la exposición prolongada aumentan. Las personas que viven en estas áreas están expuestas constantemente a niveles más altos de ELF, lo cual hace que se necesiten investigaciones adicionales sobre los efectos de dicha exposición en la salud y el bienestar humanos. Además, el crecimiento continuo de las ciudades y el aumento de la dependencia de dispositivos electrónicos y sistemas de telecomunicaciones solo exacerbar la situación.

La exposición a ELF en ciudades hiperpobladas también plantea desafíos únicos para la política pública, pues la gestión de la exposición debe tener en cuenta tanto las consideraciones de salud como las necesidades de urbanización y el desarrollo tecnológico. Las políticas deben ser flexibles y adaptarse a los cambios rápidos en la infraestructura de las ciudades, a medida que la tecnología avanza y nuevos dispositivos que generan ELF se incorporan al entorno urbano. A medida que la urbanización sigue su curso, es crucial que los gobiernos implementen políticas públicas no solo para regular la exposición a las ELF, sino también para fomentar la investigación y el monitoreo constante de estos campos en áreas de alta densidad poblacional.

La cooperación internacional también juega un papel fundamental en la gestión de las ELF, ya que las fuentes de campos electromagnéticos no se limitan a las fronteras nacionales. Los estándares internacionales y las regulaciones adoptadas en diferentes países deben alinearse para evitar brechas que puedan poner en riesgo la salud pública. A medida que las tecnologías y las

infraestructuras se globalizan, las políticas deben coordinarse para garantizar que las exposiciones a ELF sean seguras en todo el mundo. El trabajo conjunto entre gobiernos, organizaciones internacionales y científicos de diferentes países puede proporcionar una base sólida para regular las ELF y minimizar los riesgos en un contexto global.

Además de las políticas y regulaciones, la cooperación y el intercambio de información entre diferentes países son esenciales para enfrentar los desafíos emergentes relacionados con las ELF. Programas de intercambio de datos, investigación conjunta y creación de plataformas internacionales para monitorearlas y gestionarlas pueden ayudar a reducir la incertidumbre sobre los riesgos de los campos electromagnéticos y a garantizar que las políticas sean coherentes y eficaces.

El impacto de los campos ELF en la biodiversidad debe ser considerado una preocupación central en su gestión. Los estudios sobre el comportamiento de diversas especies animales expuestas a ELF, como la migración de aves y la orientación de mamíferos marinos, han comenzado a revelar que los efectos de estos campos no se limitan solo a los seres humanos. Esto resalta la necesidad de abordar el problema de manera más holística, considerando tanto la salud humana como el cuidado de los ecosistemas y las especies que dependen de entornos naturales libres de interferencias electromagnéticas. En este sentido, son esenciales los esfuerzos para minimizar la exposición a ELF en áreas de conservación y parques naturales. Establecer zonas libres de ELF en estos entornos puede convertirse en una estrategia clave dentro de las políticas de gestión ambiental.

A su vez, la creciente dependencia de tecnologías como la 5G, el internet de las cosas y la electrificación masiva en las ciudades introduce tanto oportunidades como nuevos desafíos en la gestión de las ELF. Si bien estas tecnologías prometen importantes avances en términos de eficiencia y conectividad, también aumentan el riesgo de exposición a ELF debido a la expansión de las redes de comunicación y los sistemas de energía. Por lo tanto, es fundamental desarrollar enfoques nuevos y adaptativos que logren equilibrar el progreso tecnológico con la necesidad de proteger la salud pública y el medio ambiente.

En Colombia, el gobierno nacional ha implementado normativas que establecen procedimientos y niveles de referencia para la emisión de campos electromagnéticos, alineadas con las directrices de la ICNIRP y las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). Estas regulaciones son fundamentales para asegurar que la exposición de la población a las ELF se mantenga dentro de límites seguros. Entre las normas más relevantes

se encuentran la UIT-T K.52, que proporciona orientación sobre los límites de exposición, y la UIT-T K.61, que aborda la medición y predicción de los campos electromagnéticos en instalaciones de telecomunicaciones, lo que garantiza la protección de la salud pública en áreas urbanas densamente pobladas [54].

El Decreto 1370 del 2018 y la Resolución 774 del 2018 especifican que los operadores de telecomunicaciones deben realizar cálculos simplificados para verificar que sus estaciones de radiocomunicaciones cumplen con los límites establecidos por la normativa, la cual está respaldada por la OMS. Esta regulación resulta esencial en un contexto de creciente electrificación y urbanización, pues promueve la transparencia y la responsabilidad en la gestión de la exposición a ELF, lo que contribuye a crear un entorno más seguro para los habitantes de ciudades hiperpobladas [54].

En el capítulo anterior se abordaron las experiencias internacionales de regulación de los campos electromagnéticos, centrándose en el caso de Serbia. Este país ha implementado una legislación que se alinea con las directrices de la ICNIRP, con la finalidad de establecer límites de exposición adecuados para proteger la salud humana y el medio ambiente. La Ley sobre la Protección contra la Radiación No Ionizante y los programas de monitoreo de radiación no ionizante, financiados por el gobierno, consolidan un enfoque integral en la gestión de la exposición a campos electromagnéticos, el cual incluye tanto la medición continua como la elaboración de informes anuales. Este modelo de cooperación entre las autoridades y las instituciones competentes refuerza la gestión proactiva y transparente en cuanto a la protección de la población.

Por otro lado, en Colombia, las normativas para la gestión de los campos electromagnéticos también siguen las recomendaciones internacionales, en particular las de la ICNIRP y la UIT. A través de normas como la UIT-T K.52 y la UIT-T K.61, el país ha establecido procedimientos claros para medir y controlar los niveles de exposición a las ELF, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas. A diferencia del enfoque serbio, que pone énfasis en la realización de monitoreos continuos y sistemáticos con la colaboración gubernamental, en Colombia se ha adoptado un modelo más centrado en la responsabilidad de los operadores de telecomunicaciones. Estos deben realizar cálculos simplificados para asegurar que sus estaciones cumplan con los límites establecidos, promoviendo así una mayor transparencia y responsabilidad en el control de la exposición. Sin embargo, esta diferencia en los métodos de monitoreo subraya la importancia de una gestión colaborativa y multidisciplinaria que se pueda adaptar a los desafíos específicos de cada contexto.

Referencias

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. “World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)”. Nueva York: United Nations, 2019.
- [2] TomTom Traffic Index. (2024). “Ranking 2024” [Internet]. Disponible en: <https://www.tomtom.com/traffic-index/ranking/>
- [3] R. A. Martínez Franco, L. I. Rincón Torres, F. S. Sahid Arévalo, C. A. Chacón Sánchez y C. A. Alzate Niño, *Por una movilidad sostenible: un comparativo en Bogotá de sus opciones para la transformación* [Internet], tesis especialización, Facultad de Ingeniería, Universidad EAN, Bogotá, 2023.
- [4] IEA. (2024). Trends in heavy electric vehicles. [Internet]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-heavy-electric-vehicles>
- [5] M. Snider. (2023, my. 4). “New York bans gas stoves, furnaces in new buildings”, *USA Today*. [Internet]. Disponible en: <https://www.usatoday.com/story/news/nation/2023/05/03/ny-gas-stove-ban/70179711007/>
- [6] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s. f.). “Construcción sostenible”. [Internet] Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/construccion-sostenible/>

- [7] Redacción Bogotá. (ag. 23). “Así es la nueva montaña rusa de Salitre Mágico, la más alta y rápida de Latam”. *El Espectador*. [Internet]. disponible en: <https://www.elespectador.com/bogota/asi-es-la-nueva-montana-rusa-de-salitre-magico-la-mas-alta-y-rapida-de-latam/>
- [8] Bluefire Studios. (2025). “Power Outage Tracking”. [Internet]. Disponible en: <https://poweroutage.us/>
- [9] J. Y. Liu, X. Li, B. Ni, Y. Gao y X. Yang, “The influence of geomagnetic storms on ELF electromagnetic fields in the Earth-ionosphere cavity”, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 129, pp. 43-50, 2015.
- [10] O. Amm, E. Viljanen, A. Pulkkinen, y M. Pirjola, “Geomagnetic storm effects on extremely low-frequency magnetic fields in northern Europe”, *Space Weather*, vol. 8, n.º 8, 2010.
- [11] E. D. Babayev, A. D. Allahverdiyeva e I. M. Garibov, “Geomagnetic variations and their possible effect on human health”, *Adv. Space Res.*, vol. 39, n.º 5, pp. 937-941, 2007.
- [12] Y. Hattori, Y. Yamauchi, A. Yoshino y M. Matsukawa, “Geomagnetic disturbances and extremely low-frequency magnetic fields observed in Japan”, *Space Weather*, vol. 5, n.º 4, 2007.
- [13] J. Jonnes, *Empires of light: Edison, Tesla, Westinghouse, and the race to electrify the world*, Nueva York: Random House, 2004.
- [14] U. Sonnadara, V. Cooray y M. Fernando, “The lightning radiation field spectra of cloud flashes in the interval from 20 kHz to 20 MHz”, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 48, n.º 1, pp. 234-239, 2006, <https://doi.org/10.1109/TEMC.2006.870692>
- [15] D. Wansheng, W. Jianguo y C. Chengpin, “Lightning electromagnetic radiation field spectra in the interval from 25 to 100 MHz”, en *3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2002, pp. 470-473, <https://doi.org/10.1109/ELMAGC.2002.1177472>
- [16] J. C. Willett, J. C. Bailey, C. Leteinturier y E. P. Krider. “Lightning electromagnetic radiation field spectra in the interval from 0,2 to 20 MHz”, *J. Geophys. Res.*, vol. 95, n.º D12, pp. 20367-20387, 1990, <https://doi.org/10.1029/JD095iD12p20367>
- [17] S. J. Palmer, M. J. Rycroft y M. Cermack, “Solar and geomagnetic activity, extremely low-frequency magnetic and electric fields and human health at the Earth’s surface”, *Surv. Geophys.*, vol. 27, n.º 5, pp. 557-595, 2006, <https://doi.org/10.1007/s10712-006-9010-7>

- [18] R. F. McGivern, R. Z. Sokol y W. R. Adey, "Prenatal exposure to low-frequency electromagnetic field demasculinizes adult scent marking behavior and increases accessory sex organ weights in rats", *Teratology*, vol. 41, n.º 1, pp. 1-8, 1990.
- [19] M. R. Sikov, L. D. Montgomery, L. G. Smith y R. D. Phillips, "Studies on prenatal and postnatal development in rats exposed to 60-Hz electric fields", *Bioelectromagnetics*, vol. 5, n.º 1, 101-112, 1984.
- [20] S. P. Easley, A. M. Coelho Jr. y W. R. Rogers, "Effects of exposure to a 60 kV/m, 60-Hz electric field on the social behavior of baboons", *Bioelectromagnetics*, vol. 12, n.º 6, pp. 361-375, 1991.
- [21] M. Chen y Y. Du, "Magnetic field environments at power frequency inside modern buildings", en *2013 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, Melbourne, Australia, 2013, pp. 1-4, <https://doi.org/10.1109/APEMC.2013.7360626>
- [22] S. Kottou, D. Nikolopoulos, P. H. Yannakopoulos, E. Petraki, D. Panagiotaras *et al.*, "Preliminary background indoor EMF measurements in Greece". *Physica Medica*, vol. 31, n.º 7, pp. 808-816, 2015.
- [23] P. Gajšek, P. Ravazzani, J. Grellier, T. Samaras, J. Bakos y G. Thuróczy, "Review of studies concerning electromagnetic field (EMF) exposure assessment in Europe: Low frequency fields (50 Hz-100 kHz)", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 13, n.º 9, p. 875, 2016.
- [24] E. Chiaramello, M. Bonato, S. Fiocchi, G. Tognola, M. Parazzini *et al.*, "Radio frequency electromagnetic fields exposure assessment in indoor environments: A review". *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 16, n.º 6, p. 955, 2019.
- [25] ssm's Scientific Council on Electromagnetic Fields, "Recent research on EMF and health risk", *Reports from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields*, vol. 15, n.º 8, pp. 1-100, 2021.
- [26] M. P. Maslanyj, T. J. Mee y S. G. Allen, *Investigation and identification of sources of residential magnetic field exposures in the United Kingdom Childhood Cancer Study (UKCCS) (HPA-RPD-005)*, Chilton: Health Protection Agency, 2005.
- [27] A. C. Fraser-Smith y M. M. Bowen, "The natural background levels of 50/60 Hz radio noise", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 34, n.º 3, pp. 330-337, 1992, doi: 10.1109/15.155849.
- [28] EPRI. (s. f.). EMF Around You. [Internet]. Disponible en: <https://view.ceros.com/epri/emfaroundsyouepri/p/1>

- [29] SCE. (s. f.). Committed to Your Safety. [Internet]. Disponible en: <https://www.sce.com/outages-safety/stay-safe>
- [30] Japan EMF Information Center. (s. f.). Health FAQs. [Internet]. Disponible en: <https://www.jeic-emf.jp/english/faq/Questions/health.html>
- [31] EMF. (s. f.). “Electric field and magnetic field”. [Internet]. Disponible en: <http://emf.or.kr>
- [32] EirGrid. (2015). EMF You [Internet]. Disponible en: <https://www.eirgrid.ie/emf>
- [33] Servicio Federal de Supervisión de los Derechos del Consumidor y el Bienestar Humano. (s. f.). “2.5.2. Transporte acuático. 2.2.4. Factores físicos del entorno”.
- [34] D. Ayurov y Y. Bashkuev. “Measurement results of natural and man-made ELF-VLF electromagnetic fields”, *Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP)*, 2019, pp. 228-231, <https://doi.org/10.1109/RWP.2019.8810397>
- [35] “МСанПиН 001-96. Sanitary norms of permissible levels for physical factors during use of domestic articles. Interstate Sanitary Rules and Norms, approved by the resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated January 19, 1996, n.º 2, and by the Ministry of Health of the Republic of Belarus dated June 8, 1995”, n.º 9-29-95, 1996.
- [36] Ministerio de Minas y Energía. (2024). “Reglamento técnico de instalaciones eléctricas-Retie (Resolución MME 40117)”. Bogotá: UPME. Disponible en https://www1.upme.gov.co/PromocionSector/ConvocatoriasSTN/UPME_06_2024/Anexo_1_UPME_06_2024-Descripcion_y_especificaciones_tecnicas_del%20proyecto.pdf
- [37] Hydro-Québec. (s. f.). “Electric and magnetic fields. Human health”.
- [38] ANFR. (s. f.). Cartoradio. [Internet]. Disponible en: <https://www.cartoradio.fr/#/>
- [39] ICNIRP, “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)”, *Health Phys.*, vol. 99, n.º 6, pp. 818-836, 2010, doi:10.1097/HP.0b013e3181f06c86
- [40] B. J. Klauenberg, M. Grandolfo y D. N. Erwin, eds., *Radiofrequency radiation standards*, Nueva York: Springer, 1995, doi:10.1007/978-1-4899-0945-9
- [41] Universitat de les Illes Balears. (s. f.). “Efectos de las radiaciones electromagnéticas”. [Internet]. Disponible en: <https://fci.uib.es/Servicios/>

- libros/articulos/galo/Los-Efectos-de-las-Radiaciones-Electromagneticas.cid220586
- [42] OIEA. (2016). “Normas básicas internacionales de seguridad”. [Internet]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/publications/10812/proteccion-radiologica-y-seguridad-de-las-fuentes-de-radiacion-normas-basicas-internacionales-de-seguridad>
- [43] ICRP. (s. f.). “Normativas de límites de exposición”. [Internet]. Disponible en: <https://www.icrp.org/>
- [44] ICNIRP. (s. f.). “Normativa de límites para campos electromagnéticos”. [Internet]. Disponible en: <https://www.icnirp.org/>
- [45] Secretaría Distrital de Salud de Bogotá, “Vigilancia ruido y radiación electromagnética”, *Boletín*, n.º 9, pp. 58-59, enero-marzo 2020, <https://online.fliphtml5.com/ncrbs/gnyg/#p=59>
- [46] Secretaría Distrital de Salud de Bogotá. (2019). Normatividad. [Internet]. Disponible en: https://saludambiental.saludcapital.gov.co/aire_normatividad
- [47] S. Heward, D. Urban y R. McKenzie, “Preventive surveillance programs”, en *Non-ionizing radiation protection: Summary of research and policy options*, A. W. Wood y K. Karipidis, eds., Hoboken, NJ: Wiley, 2016, pp. 456-478, <https://doi.org/10.1002/9781119284673.ch29>
- [48] Secretaría Distrital de Salud de Bogotá. (2020). “Informe anual de la vigilancia en la línea de aire, ruido y REM”. [Internet]. Disponible en: <https://online.fliphtml5.com/ncrbs/tthp/#p=1>
- [49] N. Djuric, D. Kljajic, T. Gavrilov, N. M. Golubovic y S. Djuric, “The ICRP 2020 guidelines and standardization update of Serbian EMF radiation exposure limits”, en *2022 IEEE International Symposium on Measurements & Networking (M&N)*, Padua, Italia. 2022, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/MN55117.2022.9887676>
- [50] C. R. Bhatt, S. Henderson, C. Brzozek y G. Benke, “Instruments to measure environmental and personal radiofrequency-electromagnetic field exposures: An update”, *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, vol. 45, pp. 687-704, 2022, <https://doi.org/10.1007/s13246-022-01146-y>
- [51] M. Dolan, “Public consultation and dissemination of information. Risk perception. Public involvement in decision-making regarding placement of broadcast antennas and power transmission lines”, en *Non-ionizing radiation protection: Summary of research and policy options*, A. W. Wood y K. Karipidis, eds., Hoboken, NJ: Wiley, 2016, cap. 30.

- [52] ICNIRP, “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)”, *Health Phys.*, vol. 118, n.º 5, pp. 481-492, 2020.
- [53] WHO, *Electromagnetic fields and public health: Mobile phones*, Ginebra: World Health Organization, 2006, <https://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs193/en/>
- [54] ANE. (2023). “Uso legal de los campos electromagnéticos”. [Internet]. Disponible en: <https://www.ane.gov.co/gestion-tecnica/SitePages/uso-legal/campos.aspx>
- [55] Secretaría Distrital de Salud de Bogotá. (2024). “Vigilancia de la salud ambiental. Ficha técnica de aire, ruido y radiación electromagnética”. [Internet]. Disponible en: https://www.saludcapital.gov.co/Su_Vsa/Fichas/ft_larrem.pdf

Esta publicación se compuso en la tipografía Adobe Garamond Pro.
Se publicó en Bogotá, en noviembre del 2025.



Todos los libros de Ediciones Uniandes
a un clic de distancia

Conoce nuestra página web



Escanee el código o visita
ediciones.uniandes.edu.co



Ediciones Uniandes

Monocentro de Investigación y Creación

Campos electromagnéticos de muy bajas frecuencias. Retos de la gestión en ciudades hiperurbanizadas es una obra pionera que explora la intersección entre la electrificación masiva en ciudades densamente pobladas y la presencia de campos electromagnéticos de frecuencias extremadamente bajas. Este libro ofrece una visión integral y multidisciplinaria sobre los desafíos y oportunidades que presenta la electrificación urbana sostenible, en temas cruciales como la electrificación de la movilidad urbana, la renovación de infraestructuras residenciales y la digitalización de servicios. Además, profundiza en la importancia de gestionar eficientemente estos retos para proteger la salud humana y el medio ambiente. Esta es una lectura esencial para ingenieros, urbanistas, legisladores y profesionales de la salud pública. Sus recomendaciones prácticas y su enfoque holístico ofrecen una guía valiosa para la implementación de políticas públicas que promuevan la seguridad y la sostenibilidad a largo plazo.

Con el apoyo de

enel

