

Artículo de Investigación

Modelamiento exponencial predictivo del campo electromagnético RF generado por estaciones base celulares en un entorno universitario

Predictive exponential modeling of the RF electromagnetic field generated by cellular base stations in a university environment

Javier Castillo-Heredia^{1,2}, Lorena Molina-Valdiviezo¹

¹Grupo ModSim, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 060501;

²Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad Estatal de Milagro, Milagro, Ecuador, 091050;

lmolina@unach.edu.ec

*Correspondencia: luisj.castillo@unach.edu.ec

Citación: Castillo-Heredia, J. & Molina-Valdiviezo, L., (2026). Modelamiento exponencial predictivo del campo electromagnético RF generado por estaciones base celulares en un entorno universitario. *NovasinerGía*. 9(2). 174-195.

<https://doi.org/10.37135/ns.01.18.09>

Recibido: 20 octubre 2025

Aceptado: 28 enero 2026

Publicado: 08 julio 2026

NovasinerGía

ISSN: 2631-2654

Resumen: El acelerado crecimiento de las telecomunicaciones móviles ha incrementado la densidad de radio bases en entornos urbanos y educativos, generando inquietudes sobre los posibles efectos de la exposición prolongada a campos electromagnéticos, esta situación plantea la necesidad de desarrollar estudios locales que cuantifiquen y predigan los niveles de radiación en contextos específicos, por lo cual se aplicó una metodología cuantitativa de tipo cuasi experimental, estructurada en cinco fases: planificación, recolección de datos empíricos, procesamiento, modelado matemático y validación estadística. Las mediciones se realizaron durante 34 días utilizando los equipos Narda SRM-3006 y EME Spy-200, en diferentes franjas horarias y distancias respecto a las antenas. Los datos fueron procesados con el software R, empleando pruebas estadísticas y modelos de regresión lineal, logarítmico y exponencial. Los resultados evidenciaron que la intensidad del campo eléctrico disminuye de manera exponencial al aumentar la distancia, con un coeficiente de determinación ($R^2 = 0.8844$), validando el modelo exponencial como el de mejor ajuste. Además, los valores medidos se encontraron muy por debajo de los límites establecidos por la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP), confirmando condiciones seguras de exposición. Se concluye que el modelo desarrollado constituye una herramienta científica confiable para evaluar y predecir niveles de radiación electromagnética en entornos educativos y urbanos. Su aplicación permite optimizar la ubicación de antenas, mejorar la gestión del espectro radioeléctrico y fortalecer la planificación tecnológica sostenible. Este trabajo aporta evidencia empírica relevante y un marco metodológico replicable para futuras investigaciones sobre radiación no ionizante y seguridad ambiental.

Palabras clave: Antenas celulares, Campo eléctrico, Modelamiento matemático, Modelo predictivo, Radiación electromagnética.

Abstract: The rapid growth of mobile telecommunications has increased the density of base stations in urban and educational environments, raising concerns about the possible effects of prolonged exposure to electromagnetic fields. This situation highlights the need to develop local studies that quantify and predict radiation levels in specific contexts. Therefore, a quantitative quasi-experimental methodology was employed, comprising five phases: planning, empirical data collection, data processing, mathematical modeling, and statistical validation. Measurements were conducted over 34 days using Narda SRM-3006 and EME Spy-200 equipment at different time slots and distances from the antennas. The data were processed using R software, employing statistical tests and linear, logarithmic, and exponential regression models. The results showed that the electric field intensity decreases exponentially as distance increases, with a determination coefficient ($R^2 = 0.8844$), validating the exponential model as the best fit. Furthermore, the measured values were well below the limits established by the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), confirming safe exposure conditions. It is concluded that the developed model constitutes a reliable scientific tool for assessing and predicting electromagnetic radiation levels in educational and urban environments. Its application enables optimization of antenna placement, improvement of radio spectrum management, and reinforcement of sustainable technological planning. This work provides relevant empirical evidence and a replicable methodological framework for future research on non-ionizing radiation and environmental safety.

Keywords: Cellular antennas, Electric field, Mathematical modeling, Predictive model, Electromagnetic radiation.



Copyright: 2026 derechos otorgados por los autores a NovasinerGía.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia de Creative Commons Attribution (CC BY NC). (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

1. Introducción

La expansión global de las telecomunicaciones inalámbricas ha aumentado la preocupación científica y social sobre los campos electromagnéticos de radiofrecuencia generados por las estaciones base de telefonía móvil (RF-EMF), a pesar de que los niveles promedio de la exposición son generalmente muy inferiores a los límites recomendados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica No Ionizantes (ICNIRP) [1], [2], los múltiples valores de la intensidad de campo eléctrico en las antenas emisoras, la cercanía de las personas que laboran o viven cerca de las radiobases celulares, incrementan las incertidumbres, que justifican evaluaciones periódicas [3], [4], por ejemplo en entornos educativos, donde la exposición poblacional es alta debido a que un número significativo de personas deben estar en un lugar específico, la evaluación del campo electromagnético tiene mayor interés en el momento de cuidar la seguridad de dicha población [5], [6].

En este contexto, la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) representa un escenario idóneo para el estudio de los RF-EMF, debido a su elevado número de personas que se encuentran cerca de las antenas celulares en sus instalaciones educativas, investigaciones previas en instituciones académicas y áreas urbanas han reportado que los niveles de radiación dependen significativamente: de la distancia a las radiobases, la línea de vista y el entorno construido [6]. Sin embargo, los estudios disponibles en Ecuador en su mayoría son exploratorios, lo que reduce la posibilidad de establecer modelos predictivos concretos que permitan anticipar los niveles de exposición y proyectar escenarios futuros ante el crecimiento de las tecnologías emergentes [7], [8].

Se identifica que la brecha se origina debido a limitados estudios sobre los modelos matemáticos ajustados a las condiciones específicas de los entornos académicos, las mismas que tienen la capacidad de analizar datos empíricos, con técnicas de modelamiento estadístico y computacional[9], este factor limita la toma de decisiones en la planificación de nuevas instalaciones de infraestructura de radiobases celulares y en la creación de políticas preventivas a favor de la salud pública; considerando los enfoques lineales y no lineales que han demostrado la atenuación del campo eléctrico con respecto a la distancia, aún persiste la necesidad de validar qué modelos ofrecen la mejor capacidad predictiva en escenarios específicos y con base en evidencias empíricas locales [10].

Investigaciones recientes han demostrado que, en ambientes urbanos la propagación de ondas electromagnéticas puede estar sujetas a difracción, fenómenos de reflexión y multitrayecto, aportando modificaciones importantes a los niveles de exposición de las comunidades próximas [11], [12]. Estos ejemplos muestran la necesidad de generar modelos matemáticos contextualizados a las particularidades del entorno físico y los campus educativos específicos. Pues, en el caso de la ESPOCH, la distribución espacial de los edificios, los materiales de construcción y el tráfico de usuarios influyen directamente en los resultados de las mediciones, por lo que un modelo ajustado al contexto se vuelve indispensable para la planificación de infraestructuras seguras.

La integración de metodologías cuantitativas y herramientas computacionales avanzadas, como el software R, así como prácticas que involucran regresión exponencial y polinomial, han ayudado a obtener una medida más precisa de las predicciones de los niveles de

radiación electromagnética en investigaciones previas [13], [10]. La mezcla de técnicas de medición in situ con equipos especializados de alta precisión, como Narda SRM-3006 y EME Spy-200, así como las metodologías estadísticas, proporciona datos científicos verificables que podrían replicarse en diferentes entornos de investigación. Estas metodologías reflejan que el desarrollo de los modelos de predicción eficientes no es meramente un ejercicio académico sino, por el contrario, un requisito práctico para evaluar y regular la exposición electromagnética en las instituciones educativas y la comunidad local.

Es crucial estudiar las implicaciones a largo plazo del crecimiento de las nuevas tecnologías de telecomunicaciones como las tecnologías 4G y 5G[14]; las nuevas generaciones aumentan la cantidad de radiobases de operación, disminuyen la separación entre las mismas y operan en frecuencias más altas generando así escenarios más complejos de exposición[15], en este aspecto, el impacto sobre poblaciones sensibles como estudiantes y trabajadores en establecimientos educativos es un área de interés prioritario para la investigación; los estudios internacionales comparativos han demostrado que los valores contabilizados y medidos en el presente documento están por debajo de los estándares internacionales [16], pero aún con la percepción de riesgo de la población, lo cual demuestra la necesidad de una comunicación científica clara y modelos de simulación predictiva que aumenten la confianza de la población.

Otro aspecto relevante involucra la relación entre las políticas regulatorias y la investigación científica, organismos internacionales como la OMS y la UIT recomiendan un monitoreo constante de los niveles de exposición especialmente en espacios altamente poblados [2]; sin embargo, la aplicación de estos lineamientos depende de estudios locales que avalen la aplicabilidad de las guías internacionales en entornos específicos [8].

El propósito del presente estudio radica en el diseño de un modelo matemático predictivo del comportamiento de la intensidad del campo eléctrico emitido por las antenas celulares en el campus de la ESPOCH, dicha propuesta pretende combinar mediciones in situ, realizadas mediante equipos especializados de alta precisión y técnicas de regresión estadística aplicadas en paquetes computacionales de análisis y procesamiento de datos [17], con el fin de determinar cuál es el modelo que mejor se ajusta y mayor capacidad predictiva tiene, de esa manera, no solo se cumple con la necesidad de evaluar los niveles de exposición que se presentan actualmente de acuerdo a estándares internacionales, también se brinda una herramienta útil para proyectar futuros roles, determinar la localización óptima de las antenas y, sobre todo, reforzar las políticas de seguridad educativa[18].

2. Metodología

La metodología de investigación fue diseñada de manera detallada, estructurada y secuencial para garantizar la validez de los resultados y la reproducibilidad del estudio. El trabajo adoptó un enfoque cuantitativo, de tipo cuasi experimental, orientado a la observación, medición, modelado y validación de datos sobre la intensidad del campo eléctrico (E) producido por antenas celulares ubicadas en el campus de la ESPOCH, este enfoque permitió establecer relaciones entre variables físicas, espaciales y temporales,

asegurando que los métodos empleados fueran apropiados y estadísticamente robustos [19].

2.1. *Diseño general de la metodología*

El proceso metodológico se desarrolló en cinco fases consecutivas: (1) planificación y diseño del estudio, (2) recolección de datos empíricos, (3) procesamiento y depuración de la información, (4) modelado matemático y validación estadística, (5) interpretación y contraste de resultados, como se muestra en la Figura 1, cada fase fue estructurada bajo criterios de control experimental, precisión instrumental y análisis estadístico, garantizando la trazabilidad de los resultados [20].



Figura 1. Proceso Metodológico.

Para representar de forma global la metodología aplicada, se elaboró un esquema de flujo que muestra la secuencia lógica de actividades, desde la toma de datos hasta la generación del modelo predictivo. Este esquema sirvió para visualizar el proceso de medición, procesamiento y validación de los datos, siguiendo los lineamientos propuestos por la ICNIRP [2].

2.2. *Técnicas e instrumentos de recolección de datos*

La recolección de información se realizó empleando dos instrumentos principales: el analizador de espectro Narda SRM-3006 y el monitor de campo electromagnético EME Spy-200, ambos equipos fueron seleccionados por su precisión, rango de frecuencia y capacidad de registrar mediciones en tiempo real, antes de cada sesión, se efectuó la calibración conforme a los protocolos internacionales IEC 62232 y las recomendaciones de la ICNIRP [1].

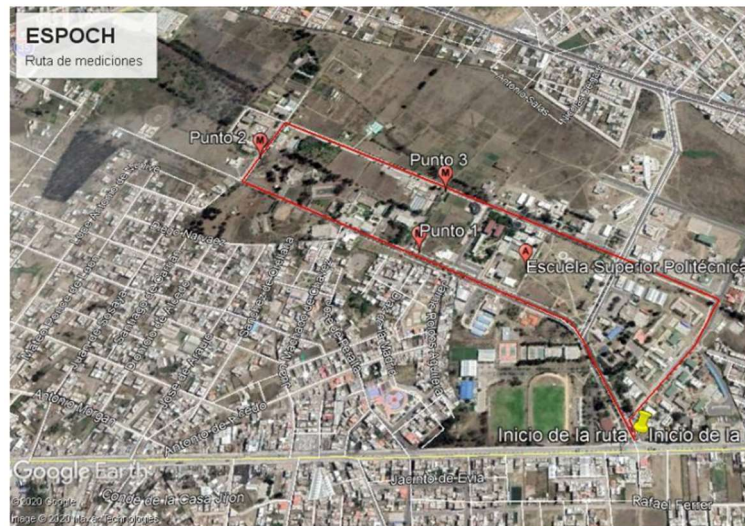


Figura 2. Ruta y ubicación de los puntos donde se realizó las mediciones.

Con el fin de contextualizar espacialmente el estudio y garantizar la trazabilidad de las mediciones realizadas, en la Figura 2 se presenta el mapa geográfico del área de estudio correspondiente al campus de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), ubicado en la ciudad de Riobamba, Ecuador.

El mapa muestra la ruta de medición seguida durante la campaña experimental, así como la ubicación de los puntos específicos donde se realizaron las mediciones del campo eléctrico, identificados como Punto 1, Punto 2 y Punto 3. Estos puntos fueron seleccionados estratégicamente considerando la proximidad a la estación base celular de interés, la accesibilidad del terreno y la representatividad del entorno urbano–educativo.

En el área circundante al campus se identifican otras estaciones base de telecomunicaciones, cuya presencia podría contribuir de manera marginal a los niveles de campo eléctrico medidos debido a fenómenos de superposición de emisiones electromagnéticas. No obstante, el análisis espectral realizado con el analizador Narda SRM-3006 permitió verificar que la componente dominante del campo eléctrico registrado corresponde a la estación base bajo estudio, operando principalmente en la banda GSM, lo que garantiza que los datos analizados reflejan de forma representativa el comportamiento de dicha estación.

La configuración espacial del campus, caracterizada por edificaciones de baja y mediana altura, áreas abiertas y zonas deportivas, influye en los mecanismos de propagación del campo electromagnético, particularmente en fenómenos de reflexión y multitrayectoria. Por ello, la incorporación del mapa geográfico permite una mejor comprensión del entorno físico donde se efectuaron las mediciones y refuerza la validez de los resultados obtenidos.

El Narda SRM-3006, con un rango operativo de 9 kHz a 6 GHz, se utilizó para mediciones puntuales de alta precisión en la banda de GSM 850 MHz, mientras que el EME Spy-200 permitió capturar datos continuos para evaluar las fluctuaciones diurnas e identificar picos de intensidad durante las horas de mayor tráfico telefónico. Las mediciones se realizaron durante 34 días consecutivos en tres franjas horarias: mañana (08:00–10:00), tarde (13:00–15:00) y noche (18:00–20:00), en total 102 mediciones, cada sesión tuvo una duración promedio de seis minutos y se efectuó con el sensor a una altura de 1,50 m del suelo,

simulando la posición promedio de la cabeza humana, tal como recomiendan los estudios de exposición humana [21],[22]

La información obtenida se organizó en la Tabla 1, datos de medición del campo eléctrico, donde se presentan los valores de la intensidad del campo eléctrico en cada punto, junto con su distancia a la antena emisora y el nivel de potencia correspondiente.

Tabla 1. Datos de medición del campo electromagnético.

DÍA	DISTANCIA (M)	INTENSIDAD (V/M)	HORA
1	40	1,356	Mañana
1	40	1,1565	Tarde
1	40	0.85210	Noche
2	45	0.99000	Mañana
2	45	0.90654	Tarde
2	45	0.89970	Noche
3	50	0.82410	Mañana
3	50	0.85200	Tarde
3	50	0.89006	Noche
4	55	0.85320	Mañana
4	55	0.84300	Tarde
4	55	112.480	Noche
5	55	0.65010	Mañana
5	60	0.85350	Tarde
5	60	0.89430	Noche
6	60	0.80430	Mañana
6	70	0.72560	Tarde
6	70	0.89260	Noche
7	70	0.82390	Mañana
7	70	0.55540	Tarde
7	75	0.78600	Noche
8	75	0.76520	Mañana
8	75	0.71822	Tarde
8	80	0.71690	Noche
9	80	0.61242	Mañana
9	80	0.52050	Tarde
9	90	0.69950	Noche
10	90	0.69050	Mañana
10	90	0.68110	Tarde
10	90	0.50860	Noche
11	90	0.51500	Mañana
11	95	0.70970	Tarde
11	95	0.67870	Noche

12	95	0.65090	Mañana
12	95	0.51250	Tarde
12	100	0.65290	Noche
13	100	0.60780	Mañana
13	100	0.56840	Tarde
13	100	0.80430	Noche
14	107	0.35540	Mañana
14	110	0.54173	Tarde
14	110	0.51526	Noche
15	110	0.32560	Mañana
15	110	0.65250	Tarde
15	120	0.55215	Noche
16	120	0.48265	Mañana
16	120	0.68054	Tarde
16	120	0.30540	Noche
17	120	0.22565	Mañana
17	130	0.50710	Tarde
17	130	0.43520	Noche
18	130	0.37000	Mañana
18	140	0.45526	Tarde
18	140	0.38520	Noche
19	140	0.25654	Mañana
19	150	0.30250	Tarde
19	150	0.37250	Noche
20	150	0.21050	Mañana
20	160	0.35360	Tarde
20	160	0.41650	Noche
21	160	0.27030	Mañana
21	170	0.28690	Tarde
21	170	0.25324	Noche
22	170	0.18560	Mañana
22	180	0.30170	Tarde
22	180	0.24650	Noche
23	180	0.21580	Mañana
23	190	0.15480	Tarde
23	190	0.23540	Noche
24	190	0.30220	Mañana
24	195	0.16980	Tarde
24	195	0.26700	Noche
25	195	0.10070	Mañana

25	200	0.15950	Tarde
25	200	0.17880	Noche
26	200	0.20580	Mañana
26	205	0.15690	Tarde
26	205	0.20640	Noche
27	205	0.10560	Mañana
27	210	0.12620	Tarde
27	210	0.16000	Noche
28	210	0.08050	Mañana
28	215	0.14610	Tarde
28	215	0.19230	Noche
29	215	0.25580	Mañana
29	215	0.07520	Tarde
29	220	0.10520	Noche
30	220	0.15652	Mañana
30	220	0.12052	Tarde
30	225	0.09772	Noche
31	225	0.14696	Mañana
31	225	0.17055	Tarde
31	230	0.12980	Noche
32	230	0.15260	Mañana
32	230	0.10870	Tarde
32	230	0.20550	Noche
33	235	0.18970	Mañana
33	235	0.15720	Tarde
33	235	0.09540	Noche
34	240	0.06961	Mañana
34	240	0.16010	Tarde
34	240	0.13210	Noche

Respecto a la comparación temporal por distancia, se observó que en el punto de menor separación la intensidad del campo eléctrico puede disminuir con mayor rapidez entre el periodo diurno y nocturno, mientras que a distancias mayores el comportamiento aparenta ser inverso. Este patrón no necesariamente implica una inconsistencia del modelo o de las mediciones, sino que puede explicarse por la combinación de factores operativos y de propagación.

En primer lugar, a corta distancia el campo está fuertemente influenciado por condiciones locales del entorno (ocupación del campus, movilidad de personas y vehículos, presencia de estructuras cercanas), lo que intensifica efectos de sombreado, reflexión y multitrayectoria, produciendo fluctuaciones más marcadas entre periodos del día. Adicionalmente, la geometría de radiación de la antena (tilt y patrón del lóbulo principal)

puede generar que puntos muy cercanos no se encuentren en la dirección de máxima radiación, incrementando la variabilidad local.

En contraste, a mayor distancia el comportamiento del campo tiende a ser más estable y, en ciertos casos, puede incrementarse ligeramente durante la tarde o noche debido a factores operativos de la red, como el aumento del tráfico y el uso de recursos de transmisión, lo que modifica la potencia radiada efectiva. Por ello, la aparente inversión de tendencia entre corta y larga distancia se interpreta como un efecto combinado de propagación y operación de red en condiciones reales de medición.

2.3. *Técnicas para el Procesamiento y depuración de datos*

El procesamiento de datos se realizó utilizando el software R (versión 4.3.2) [23], que permitió la limpieza, organización y análisis de los valores medidos, también se implementaron librerías estadísticas especializadas (*dplyr*, *ggplot2*, *nortest*, *car*) para garantizar un análisis robusto de los datos; previo al modelado, los valores anómalos fueron depurados mediante la prueba de Grubbs y los datos se normalizaron para evitar sesgos asociados a condiciones ambientales.

2.4. *Modelado matemático y evaluación estadística*

Posteriormente, se aplicaron distintos modelos de regresión (lineal, exponencial, logarítmico), con el fin de identificar la función que mejor describiera la relación entre la intensidad del campo eléctrico y la distancia. Los modelos fueron evaluados mediante el coeficiente de determinación (R^2), el error estándar residual (SEE) y la prueba de normalidad de Lilliefors, que verificó la distribución de los residuos. Los valores obtenidos se compararon con los límites establecidos por la ICNIRP (2020) [1].

2.5. *Interpretación de datos*

La interpretación de los resultados permitió validar el modelo propuesto y evidenciar la aplicabilidad de la metodología en escenarios urbanos y educativos. El uso del software R posibilitó la visualización gráfica de los datos mediante curvas de tendencia, intervalos de confianza y análisis de residuales, reforzando la confiabilidad del modelo. Asimismo, la triangulación entre los resultados empíricos, las predicciones teóricas y los estándares internacionales fortaleció la consistencia interna del estudio.

3. **Resultados**

En esta sección se presentan los resultados derivados del procesamiento y modelamiento de los datos obtenidos en campo, correspondientes a la intensidad del campo eléctrico (E) generado por las antenas celulares ubicadas en la (ESPOCH), los datos fueron analizados utilizando el software R, aplicando técnicas de regresión con el fin de determinar el modelo matemático más adecuado para representar el comportamiento de la radiación en función de la distancia.

3.1. *Fundamentación del modelamiento*

La elección de los modelos exponencial, lineal y logarítmico respondió a fundamentos tanto teóricos como empíricos [24]. En el ámbito de la propagación electromagnética, la atenuación del campo eléctrico con la distancia suele presentar una tendencia no lineal, influenciada por la dispersión, absorción atmosférica y pérdidas en el espacio libre. De acuerdo con la teoría de Maxwell y la ley del inverso del cuadrado, la intensidad del campo disminuye de forma proporcional a la distancia y, en muchos casos, sigue un patrón exponencial [20]. Por tanto, el modelo exponencial se consideró como el candidato principal.

No obstante, para validar el comportamiento observado y descartar simplificaciones excesivas, se aplicaron también los modelos lineal y logarítmico, que permiten explorar relaciones de dependencia directa y decreciente con la distancia. Este enfoque comparativo aseguró una selección basada en evidencia estadística y física, fortaleciendo la validez del modelo final.

3.2. *Modelo exponencial*

El modelo exponencial se ajustó con la ecuación:

$$[E(d) = 1,642276 \times e^{-0.01107d}] \quad (1)$$

Con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.8844$, indicando que el modelo explica el 88.44% de la variabilidad observada, con un p-valor $2,2e-16$. Para reforzar la validación del modelo predictivo exponencial, además del coeficiente de determinación (R^2), se calcularon métricas de error ampliamente utilizadas en evaluación de modelos: el Error Absoluto Medio (MAE) y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE).

Las métricas obtenidas fueron $MAE = 0.083$ V/m y $RMSE = 0.101$ V/m, lo que indica errores de predicción reducidos en relación con los valores medidos. Estos resultados confirman la capacidad del modelo exponencial para reproducir adecuadamente la atenuación del campo eléctrico con la distancia, manteniendo una buena precisión predictiva en un entorno universitario real. La Figura 3 muestra las mediciones observadas de la intensidad en función de la distancia, evidenciando una tendencia decreciente consistente con un decaimiento exponencial.

Se observó que, a distancias menores de 50 m, la intensidad del campo supera 1.0 V/m, mientras que más allá de los 200 m, los valores disminuyen a 0.1 V/m o menos, esta reducción progresiva es coherente con la atenuación típica en entornos urbanos, donde la presencia de estructuras, reflexiones y multitrayectos modifican la propagación ideal en espacio libre. También la homogeneidad en la pendiente de la curva sugiere que el campo dominante se comporta dentro de la región de campo lejano, donde la componente radiada predomina sobre las componentes reactivas.

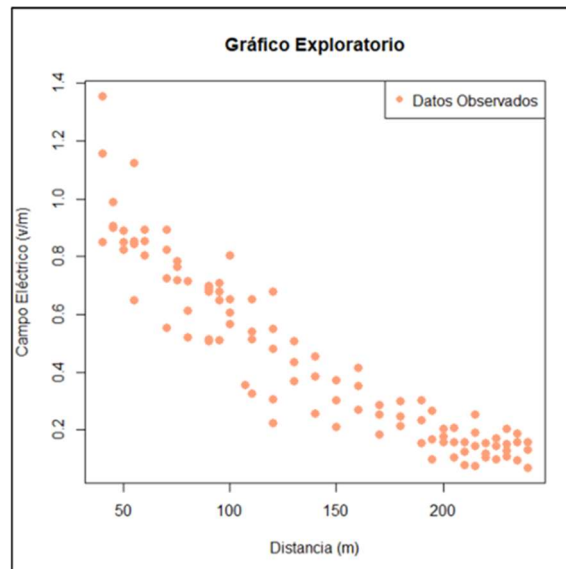


Figura 3. Mediciones observadas mediante regresión exponencial.

En la Figura 4, que representa las mediciones reales con las predicciones del modelo, se aprecia un ajuste casi perfecto entre la curva modelada y los puntos empíricos. El error medio cuadrático (RMSE) resultó bajo, lo que refuerza la capacidad predictiva del modelo; este resultado demuestra que la energía electromagnética se disipa principalmente por propagación esférica y atenuación logarítmica de la intensidad, en concordancia con la teoría de ondas radiadas. Otro punto importante es que los valores obtenidos se mantienen por debajo de los 2 V/m, cumpliendo ampliamente con las restricciones impuestas por la norma ICNIRP para entornos poblacionales.

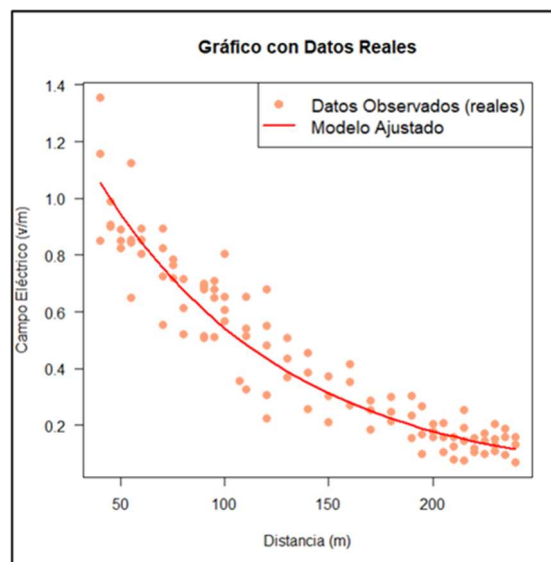


Figura 4. Mediciones reales de la de regresión exponencial.

En la Figura 5 se aprecia que los residuos presentan un patrón de heterocedasticidad, evidenciado por la variación irregular de su dispersión respecto a los valores ajustados, dicho comportamiento sugiere que la varianza de los errores no se mantiene constante a lo largo del rango de predicciones, lo cual puede influir en la precisión de las estimaciones y en la solidez de las inferencias estadísticas derivadas del modelo.

En los diagramas de dispersión se identificó un dato atípico correspondiente a la medición realizada a la menor distancia respecto a la estación base. Este comportamiento anómalo puede atribuirse a efectos locales de propagación electromagnética, tales como multitrayectoria, reflexiones en estructuras cercanas y variaciones en la línea de vista, fenómenos que suelen ser más pronunciados en las proximidades de la fuente emisora.

En regiones cercanas a la antena pueden coexistir componentes del campo cercano radiado, donde la distribución espacial del campo eléctrico no sigue estrictamente un comportamiento monótono, lo que genera fluctuaciones puntuales en los valores medidos. Por esta razón, el dato fue conservado en el conjunto de análisis, al considerarse representativo de las condiciones reales de medición.

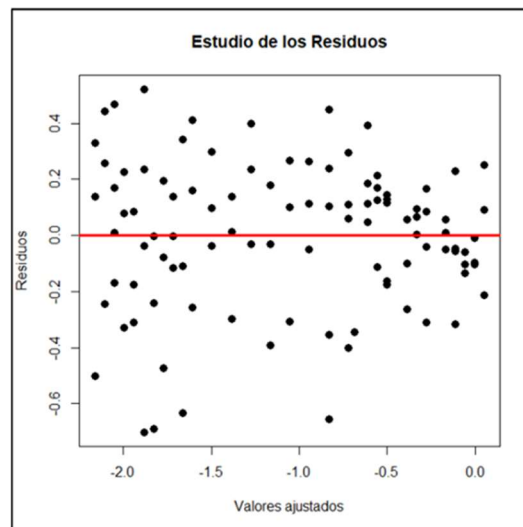


Figura 5. Homocedasticidad e independencia.

El test de normalidad de Lilliefors arrojó un valor $D = 0.07694$ con $p = 0.1449$ (> 0.05), por lo que no se rechaza la hipótesis de normalidad, este resultado respalda que los residuos se distribuyen aproximadamente de forma normal, cumpliendo con uno de los supuestos fundamentales del análisis de regresión.

3.3. Modelo lineal

El modelo lineal se expresó como:

$$[E(d) = 1,1788419 - 0,00480157d] \quad (2)$$

El R^2 obtenido fue 0.6097, revelando que la linealidad no capta adecuadamente la naturaleza del fenómeno físico. En la Figura 6, que muestra las mediciones observadas, la tendencia general es decreciente, pero presenta dispersión en torno a la recta ajustada, a medida que la distancia aumenta, el modelo subestima las intensidades próximas y sobrestima las más alejadas, lo que sugiere un patrón no uniforme de pérdidas.

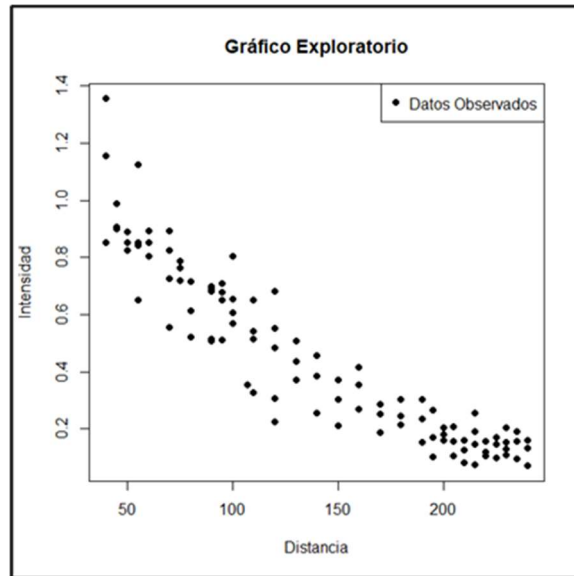


Figura 6. Mediciones exploratorias de la regresión lineal.

Este comportamiento se asocia con la incapacidad del modelo lineal para representar el efecto de la absorción electromagnética y las fluctuaciones inducidas por el entorno, desde el punto de vista electromagnético, la energía radiada se distribuye de forma esférica y no lineal, por lo que las simplificaciones lineales pueden inducir errores en la proyección del campo. Sin embargo, su inclusión permitió confirmar que el decrecimiento observado no es estrictamente proporcional, descartando un comportamiento de atenuación constante.

La Figura 7, que muestra las mediciones reales comparadas con las predicciones lineales, refuerza esta conclusión, evidenciando desviaciones sistemáticas que se incrementan con la distancia, estas diferencias se explican por los efectos de difracción y dispersión que alteran la homogeneidad del frente de onda.

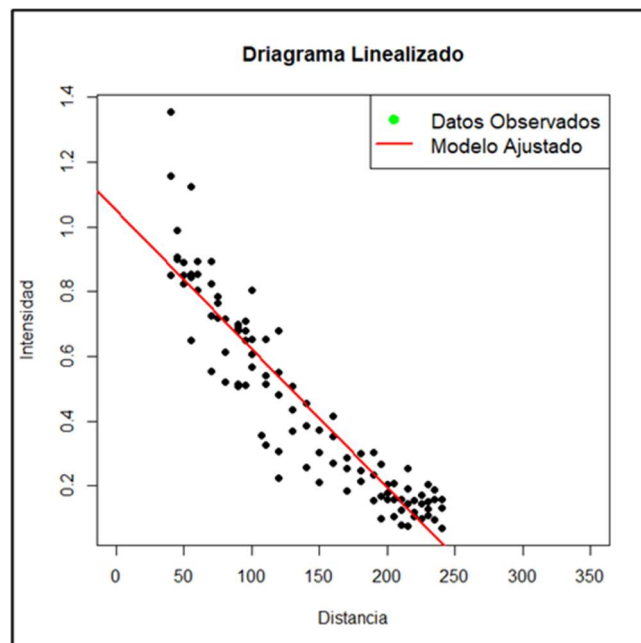


Figura 7. Diagrama linealizado.

3.4. Modelo logarítmico

El modelo logarítmico se formuló como:

$$[E(d) = 3.5294 - 0.6279 \log(d)] \quad (3)$$

El R^2 fue de 0.7203, reflejando un ajuste intermedio entre los modelos lineal y exponencial. La Figura 8 presenta las mediciones observadas, en las cuales la reducción del campo con la distancia sigue una curva suavemente decreciente, evidenciando que la atenuación no ocurre a un ritmo constante, este modelo permite interpretar que la influencia de la distancia sobre el campo eléctrico se reduce conforme aumenta la separación de la fuente.

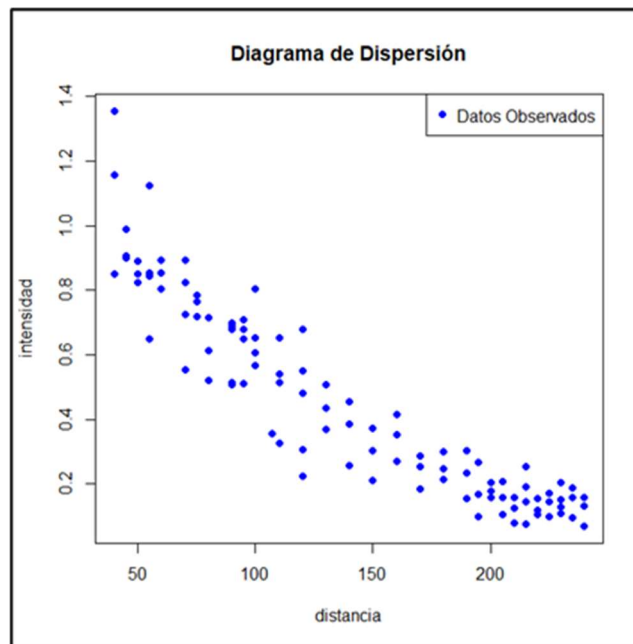


Figura 8. Diagrama de dispersión del modelo logarítmico.

En términos físicos, este patrón logarítmico indica una transición gradual hacia niveles de campo eléctrico estables a grandes distancias, donde el gradiente de energía se vuelve casi uniforme. Este fenómeno es típico de la zona de campo lejano, donde la propagación se estabiliza y los efectos de reflexión se reducen. No obstante, la curva predicha, mostrada en la Figura 9, tiende a sobreestimar ligeramente las intensidades a bajas distancias, lo que demuestra que el modelo no representa con total precisión el comportamiento de los lóbulos de radiación y los efectos del entorno urbano.

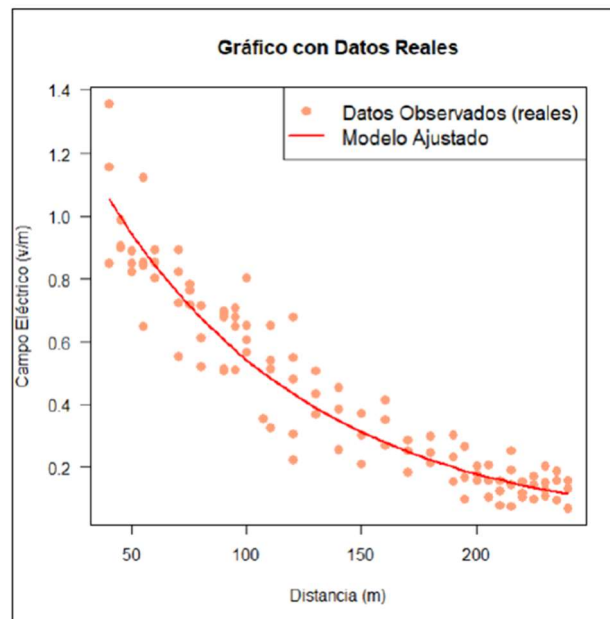


Figura 9. Ajuste del modelo logarítmico.

La comparación entre mediciones reales y predicciones confirma que, si bien el modelo logarítmico describe correctamente la tendencia general, el modelo exponencial ofrece una mejor correspondencia con la física del fenómeno y la distribución empírica de los datos.

3.5. Comparación de desempeño y validación final

La comparación cuantitativa mostró que el modelo exponencial obtuvo el mejor ajuste ($R^2 = 0.8844$), seguido del logarítmico ($R^2 = 0.7203$) y finalmente del lineal ($R^2 = 0.6097$). Estas diferencias reflejan la capacidad de cada modelo para capturar la no linealidad inherente al decaimiento del campo eléctrico.

Desde un punto de vista técnico, el modelo exponencial no solo optimiza el ajuste estadístico, sino que además concuerda con las ecuaciones de propagación electromagnética en medios libres, garantizando una interpretación físicamente consistente. La Figuras 10 verifican que los valores predichos se mantienen por debajo de los límites de exposición definidos por la ICNIRP (2020) [2], lo cual valida tanto la seguridad de la radiación en el entorno universitario como la confiabilidad del modelo propuesto para aplicaciones predictivas futuras.

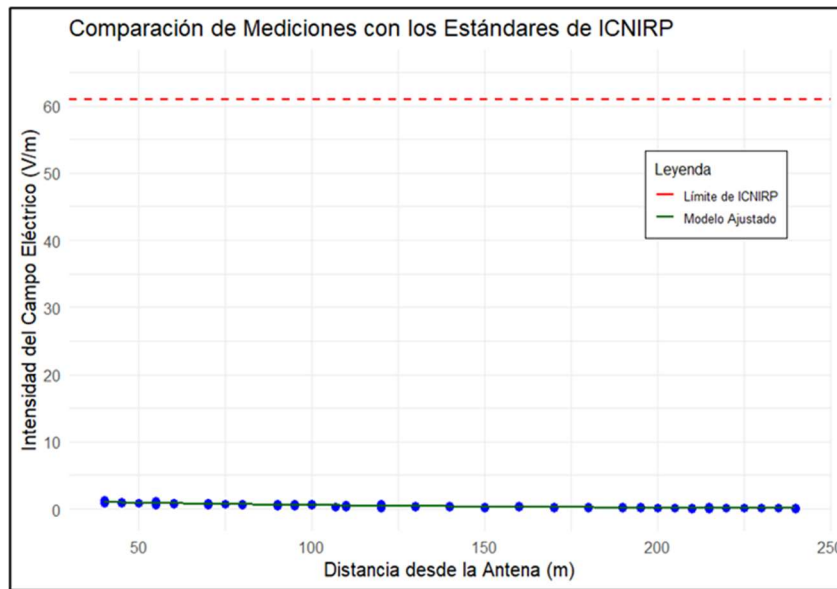


Figura 10. Comparación entre los valores medidos y modelados de la intensidad del campo eléctrico (V/m) y los límites de referencia establecidos por la ICNIRP.

3.6. Análisis comparativo de la intensidad del campo eléctrico por periodo del día

Con el objetivo de analizar la variabilidad temporal de la intensidad del campo eléctrico, se realizó un análisis comparativo de las mediciones obtenidas durante los periodos de mañana, tarde y noche. La Figura 11 presenta un diagrama de cajas que resume la distribución estadística de los valores medidos para cada franja horaria.

Los resultados muestran que las medianas de intensidad del campo eléctrico son similares entre los tres periodos, situándose alrededor de 0.5 V/m, lo que indica una exposición relativamente estable a lo largo del día. No obstante, se observa una ligera variación en la dispersión de los datos, siendo la franja de la tarde y la noche las que presentan mayor rango intercuartílico, lo que sugiere una mayor variabilidad en los niveles medidos.

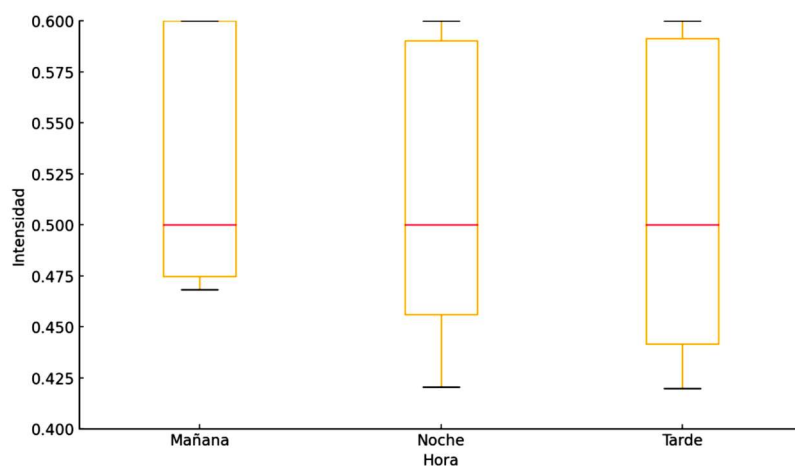


Figura 11. Diagrama de cajas de la intensidad del campo eléctrico (V/m) para los periodos de mañana, tarde y noche.

Estas diferencias pueden atribuirse a factores operativos de la red celular, tales como el incremento del tráfico de usuarios durante la tarde y la noche, así como a condiciones ambientales y de propagación, incluyendo reflexiones en estructuras cercanas y variaciones en la ocupación del entorno universitario.

Desde el punto de vista estadístico, las variaciones observadas no representan cambios significativos en términos de exposición, ya que los valores medidos en todos los periodos se mantienen muy por debajo de los límites de referencia establecidos por la ICNIRP. En consecuencia, el análisis temporal confirma que la intensidad del campo eléctrico en el entorno de estudio no presenta fluctuaciones relevantes que impliquen un aumento del riesgo para la población, reforzando la consistencia y estabilidad de los resultados obtenidos.

4. Discusión

El principal hallazgo de esta investigación demuestra que los niveles de intensidad del campo eléctrico generados por las antenas celulares en el campus de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) se encuentran por debajo de los límites establecidos por la ICNIRP (2020) [1],[2] confirmando que la exposición a radiación electromagnética en entornos educativos de alta densidad poblacional no representa un riesgo significativo para la salud; este resultado valida la eficacia del modelo matemático desarrollado para predecir la intensidad del campo eléctrico en función de la distancia, demostrando su aplicabilidad tanto en la gestión ambiental como en la planificación de telecomunicaciones [25],[26].

Desde una perspectiva técnica, los resultados confirman la correlación inversa entre la distancia y la intensidad del campo eléctrico, consistente con las leyes de propagación de ondas electromagnéticas y la teoría de Maxwell [20],[27]. El modelo de regresión exponencial mostró un mejor ajuste estadístico en comparación con los modelos lineales y logarítmicos, al presentar valores superiores del coeficiente de determinación (R^2) y menor error estándar residual [9],[28]. Esto evidencia que la atenuación del campo eléctrico sigue una tendencia de decaimiento exponencial, coherente con investigaciones previas realizadas por Infante-Moreira et al. [7] y Bhatt et al. [5], quienes reportaron resultados similares en entornos urbanos con alta densidad de radiobases.

En comparación con estudios internacionales, como los de Permyakov et al. [29] y De Guidici et al. [3], los hallazgos de este trabajo coinciden en que los niveles de radiación medida se mantienen dentro de los márgenes de seguridad definidos por la ICNIRP, reforzando la validez del modelo aplicado; sin embargo, una diferencia relevante radica en el enfoque predictivo de esta investigación, que incorpora modelamiento matemático ajustado a condiciones locales, lo que amplía la aplicabilidad práctica del modelo propuesto y su potencial para otros entornos similares [6],[30].

El análisis comparativo con estudios recientes publicados en revistas IEEE permite contextualizar los resultados obtenidos y destacar los aportes del presente trabajo. En particular, Wali et al. [31] realizaron mediciones de exposición RF-EMF en estaciones base 5G mmWave con antenas MIMO, enfocándose en la caracterización experimental del campo electromagnético y su comparación con los límites normativos. Si bien dicho estudio aporta información relevante sobre escenarios de alta frecuencia, su objetivo principal es descriptivo y no incorpora un modelo matemático predictivo explícito.

De manera similar, Lee et al. [32] evaluaron los niveles de campo electromagnético en un entorno urbano real con tecnología 5G NR en Seúl, reportando valores ambientales

significativamente inferiores a los límites internacionales. No obstante, el estudio se centra en la medición y caracterización espacial, sin abordar un análisis predictivo del comportamiento del campo eléctrico en función de la distancia.

Por su parte, Adda et al. [33] propusieron una metodología teórica y experimental para la medición del campo electromagnético radiado por estaciones base 5G, considerando aspectos como la extrapolación de potencia máxima y la variabilidad temporal del tráfico. Aunque este enfoque fortalece la evaluación normativa, no plantea un modelo empírico de predicción validado mediante métricas de error.

En el ámbito de sistemas avanzados, Aerts et al. [34] desarrollaron una metodología in situ para la evaluación de la exposición en estaciones 5G NR Massive MIMO en la banda sub-6 GHz, destacando la complejidad asociada al beamforming y la necesidad de procedimientos de medición específicos. En contraste, el presente estudio propone un modelo exponencial simple e interpretable, adecuado para entornos reales como campus universitarios, donde se requiere una herramienta práctica para estimar la atenuación del campo eléctrico con la distancia.

Asimismo, Villaescusa-Tebar y García-Pardo [35] analizaron la exposición RF-EMF durante eventos públicos de gran escala, evidenciando que la densidad de usuarios y la carga de red influyen en la variabilidad temporal de los niveles medidos. Estos hallazgos son consistentes con los resultados obtenidos en este trabajo al comparar las mediciones por periodos del día (mañana, tarde y noche), confirmando que, pese a la variabilidad temporal, el comportamiento global del campo eléctrico puede describirse adecuadamente mediante una tendencia exponencial.

La importancia de estos hallazgos radica en que proporcionan una herramienta de predicción útil para la gestión y regulación del espectro electromagnético, especialmente en instituciones educativas. El modelo desarrollado permite anticipar escenarios de exposición y optimizar la ubicación de antenas, contribuyendo así a la planificación urbana sostenible y a la protección de la salud pública [6], [36]. Además, al validar los resultados con mediciones reales obtenidas mediante los equipos Narda SRM-3006 y EME Spy-200, se refuerza la robustez metodológica del estudio y su pertinencia en el contexto ecuatoriano [7].

Entre las limitaciones del estudio se reconoce que las mediciones se realizaron en un periodo temporal limitado y en condiciones ambientales específicas, lo que podría influir en la variabilidad de los resultados. Asimismo, el modelo se ajustó principalmente a escenarios urbanos; por lo tanto, futuras investigaciones podrían ampliar su aplicación a entornos rurales o mixtos, así como integrar técnicas de inteligencia artificial (IA) para mejorar la capacidad predictiva y la automatización del análisis de datos [37].

Desde un punto de vista práctico, los resultados permiten sugerir implicaciones directas para el diseño de políticas públicas orientadas a la regulación de la instalación de antenas, la evaluación de la exposición en espacios públicos y la implementación de medidas de monitoreo continuo [38],[39]. Teóricamente, los hallazgos fortalecen el cuerpo de conocimiento sobre la propagación de campos electromagnéticos, validando la pertinencia

de los modelos exponenciales en la descripción del comportamiento de la radiación no ionizante [23], [40].

Este estudio demuestra que el modelo matemático propuesto no solo predice con precisión los niveles de radiación electromagnética, sino que también ofrece una base científica sólida para la gestión responsable del espectro radioeléctrico en el contexto académico y urbano. Estos resultados abren la posibilidad de desarrollar modelos híbridos apoyados en IA y aprendizaje automático para optimizar la predicción de radiación en tiempo real, consolidando así un aporte significativo tanto para la investigación científica como para las aplicaciones tecnológicas futuras [41], [42], [43], [44].

5. Conclusiones

El presente estudio permitió diseñar y validar un modelo matemático predictivo para describir el comportamiento de la intensidad del campo eléctrico generado por antenas celulares en el campus de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH); los resultados evidenciaron que los niveles de exposición se encuentran significativamente por debajo de los límites establecidos por la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP), lo que confirma la seguridad de la radiación electromagnética en el entorno educativo analizado.

La atenuación del campo eléctrico sigue una tendencia exponencial inversamente proporcional a la distancia, siendo el modelo exponencial el que mejor se ajusta a los datos empíricos, con un coeficiente de determinación ($R^2 = 0.8844$), superando a los modelos lineales y logarítmicos. Este hallazgo valida el uso del modelo exponencial como herramienta precisa para la predicción de la intensidad del campo eléctrico en entornos urbanos y educativos, permitiendo anticipar escenarios de exposición y garantizar condiciones seguras para la población.

En términos prácticos, la investigación aporta un marco metodológico replicable que puede ser utilizado por entidades académicas, gubernamentales y de telecomunicaciones para la planificación de nuevas infraestructuras de radiobases, contribuyendo así a una gestión sostenible del espectro radioeléctrico. Desde una perspectiva teórica, los resultados fortalecen el cuerpo de conocimiento sobre la propagación electromagnética en entornos reales, demostrando que los modelos matemáticos ajustados a contextos locales proporcionan mayor exactitud que las aproximaciones genéricas.

También este trabajo demuestra la relevancia de integrar herramientas computacionales, como el software R, con equipos de medición de alta precisión (Narda SRM-3006 y EME Spy-200) para el análisis de datos electromagnéticos, la combinación de técnicas empíricas y analíticas permitió obtener resultados confiables que respaldan el diseño de modelos predictivos aplicables en diversas áreas científicas y tecnológicas.

Entre las limitaciones del estudio se destaca el carácter temporal y espacial restringido de las mediciones, que se realizaron bajo condiciones ambientales específicas, por lo cual para futuros trabajos deberían ampliar la cobertura espacial e incorporar el análisis de variables atmosféricas, así como la implementación de modelos basados en inteligencia artificial (IA) para mejorar la precisión y automatización del modelado. Además, se sugiere replicar la

metodología en otros entornos, como zonas rurales o industriales, con el fin de contrastar los resultados y fortalecer la validez externa del modelo.

El modelo desarrollado constituye una herramienta científica robusta para evaluar y predecir los niveles de exposición a campos electromagnéticos, alineándose con las recomendaciones internacionales de la ICNIRP; por lo cual, este estudio aporta evidencia técnica relevante para la toma de decisiones en políticas de seguridad radiológica y urbanismo tecnológico, abriendo nuevas líneas de investigación en el ámbito del modelamiento predictivo de radiación electromagnética y sus aplicaciones en la ingeniería y la salud pública.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, J.C. y L.M.; metodología, J.C. y L.M.; software, J.C. y L.M.; validación, L.M.; análisis formal, L.M.; investigación, J.C. y L.M.; curación de datos, J.C.; redacción—preparación del borrador original, J.C.; redacción—revisión y edición, L.M.; visualización, J.C.; supervisión, L.M.; administración del proyecto, L.M. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de Interés

Los autores manifiestan que no existe ningún tipo de conflicto de interés, ya sea, financiero, personal o académico, que pueda influir en los resultados y conclusiones de este estudio.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial Generativa

En la preparación de este artículo, se utilizó ChatGPT-5 para la corrección gramatical y la mejora de la redacción. Todo el contenido fue revisado y aprobado por los autores.

Referencias

- [1] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Principles for non-ionizing radiation protection," *Health Phys*, vol. 118, no. 5, pp. 477–482, may. 2020, doi: 10.1097/HP.0000000000001252.
- [2] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "A Description of ICNIRP'S Independent, Best Practice System of Guidance on the Protection of People and the Environment from Exposure to Non-Ionizing Radiation," *Health Phys*, vol. 122, no. 5, pp. 625–628, may. 2022, doi: 10.1097/HP.0000000000001561.
- [3] P. De Giudici *et al.*, "Radiofrequency exposure of people living near mobile-phone base stations in France," *Environ Res*, vol. 194, mar. 2021, doi: 10.1016/j.envres.2020.110500.
- [4] T. Koppel y L. Hardell, "Measurements of radiofrequency electromagnetic fields, including 5G, in the city of Columbia, SC, USA," *World Acad Sci J*, vol. 4, no. 3, mar. 2022, doi: 10.3892/wasj.2022.157.
- [5] C. R. Bhatt *et al.*, "Micro-environmental personal radio-frequency electromagnetic field exposures in Melbourne: A longitudinal trend analysis," *Environ Res*, vol. 251, jun. 2024, doi: 10.1016/j.envres.2024.118629.
- [6] R. Ramirez-Vazquez, I. Escobar, A. Thielens, y E. Arribas, "Measurements and analysis of personal exposure to radiofrequency electromagnetic fields at outdoor and indoor school buildings: A case study at a Spanish school," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 195692–195702, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3033800.

- [7] P. S. Infante Moreira, N. Ortiz Mosquera, y X. Trujillo, "Análisis de los Niveles de Campos Eléctricos de la Banda GSM 1900MHz en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo," *Perspectivas*, vol. 2, no. 1, pp. 8–13, ene. 2020, doi: 10.47187/perspectivas.vol2iss1.pp8-13.2020.
- [8] L. Pazmiño, F. Flores, F. Becerra, G. Cevallos, y R. Rivera, "Challenges and Opportunities of 5G Deployment in Ecuador (extended version)," 2023. [En línea]. Disponible en: <https://easychair.org/publications/paper/WJ2k>
- [9] D. Maulud y A. M. Abdulazeez, "A Review on Linear Regression Comprehensive in Machine Learning," *Journal of Applied Science and Technology Trends*, vol. 1, no. 2, pp. 140–147, dic. 2020, doi: 10.38094/jastt1457.
- [10] M. Fernández-Delgado, M. S. Sirsat, E. Cernadas, S. Alawadi, S. Barro, y M. Febrero-Bande, "An extensive experimental survey of regression methods," *Neural Networks*, vol. 111, pp. 11–34, mar. 2019, doi: 10.1016/J.NEUNET.2018.12.010.
- [11] G. Feng, J. Huang, y Z. Wu, "Overcoming geometric issues in the multipath propagation of electromagnetic waves using ray tracing and spherical ground surface theory," *Optik*, vol. 181, pp. 326–337, mar. 2019, doi: 10.1016/J.IJLEO.2018.12.093.
- [12] S. Li, G. Cui, S. Guo, C. Jia, L. Kong, y X. Yang, "On the Electromagnetic Diffraction Propagation Model and Applications," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 13, pp. 884–895, 2020, doi: 10.1109/JSTARS.2020.2974529.
- [13] A. Joudah Irshayid y R. Abdulrida Saleh, "Robust Estimates for One-Parameter Exponential Regression Model," 2022. [Online]. Disponible en: <http://jeasiq.uobaghdad.edu.iq>
- [14] N. A. Krivova *et al.*, "The effect of exposure to RF-EMF from the laboratory simulator of 5G NR base station on physiological parameters and cognitive abilities of male wistar rats of different ages," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, dic. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-60862-5.
- [15] S. Wall, Z. M. Wang, T. Kendig, D. Dobraca, y M. Lipsett, "Real-world cell phone radiofrequency electromagnetic field exposures," *Environ. Res.*, vol. 171, pp. 581–592, abr. 2019, doi: 10.1016/J.ENVRES.2018.09.015.
- [16] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)," May 01, 2020, *Lippincott Williams and Wilkins*. doi: 10.1097/HP.0000000000001210.
- [17] A. H. Sallomi y G. A. Ahmed, "Simulating the specific absorption rates in different human tissues at 4G frequencies for mobile phones," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 12, no. 5, pp. 2860–2869, oct. 2023, doi: 10.11591/eei.v12i5.5058.
- [18] C. Hao, X. Wan, D. Feng, Z. Feng, y X.-G. Xia, "Satellite-Based Radio Spectrum Monitoring: Architecture, Applications, and Challenges," *IEEE Netw.*, vol. 35, no. 4, pp. 20–27, jul. 2021, doi: 10.1109/MNET.011.2100015.
- [19] A. Lala, B. Kamo, J. Jordji y E. Agastra, "Modeling of Radio Base Stations with the Numerical FDTD Method, for the Electromagnetic Field Evaluation," *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Springer International Publishing, pp. 968–977, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-75928-9_89.
- [20] V. V. Obukhov, "Maxwell's Equations in Homogeneous Spaces for Admissible Electromagnetic Fields," *Universe*, vol. 8, no. 4, abr. 2022, doi: 10.3390/universe8040245.
- [21] R. A. Michaels, "Telecommunications, Electromagnetic Fields, and Human Health," *Environmental Claims Journal*, vol. 31, no. 2, pp. 93–132, abr. 2019, doi: 10.1080/10406026.2019.1603442.
- [22] J. S. Long y S. A. Mustillo, "Using Predictions and Marginal Effects to Compare Groups in Regression Models for Binary Outcomes," *Sociol Methods Res.*, vol. 50, no. 3, pp. 1284–1320, oct. 2021, doi: 10.1177/0049124118799374.
- [23] R Core Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.R-project.org/>
- [24] J. Suzuki, "Nonlinear Regression," in *Statistical Learning with Math and R: 100 Exercises for Building Logic*, Singapore: Springer Nature Singapore, pp. 117–146, 2020. doi: 10.1007/978-981-15-7568-6_7.
- [25] S. Bates y R. Tibshirani, "Log-ratio lasso: Scalable, sparse estimation for log-ratio models," *Biometrics*, vol. 75, no. 2, pp. 613–624, nov. 2018, doi: 10.1111/biom.12995.
- [26] A. Massa *et al.*, "Designing Smart Electromagnetic Environments for Next-Generation Wireless Communications," *Telecom*, vol. 2, no. 2, pp. 213–221, may. 2021, doi: 10.3390/telecom2020014.

- [27] C. Skouroumounis y I. Krikidis, "Fluid Antenna With Linear MMSE Channel Estimation for Large-Scale Cellular Networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 71, no. 2, pp. 1112–1125, feb. 2023, doi: 10.1109/TCOMM.2022.3230861.
- [28] J. V Terza, "Regression-Based Causal Analysis from the Potential Outcomes Perspective," *J. Econom. Methodol.* vol. 9, no. 1, jun. 2019, doi: 10.1515/jem-2018-0030.
- [29] V. A. Permyakov, M. S. Mikhailov, y E. S. Malevich, "Analysis of Propagation of Electromagnetic Waves in Difficult Conditions by the Parabolic Equation Method," *IEEE Trans Antennas Propag.*, vol. 67, no. 4, pp. 2167–2175, abr. 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2905674.
- [30] J. S. Long y S. A. Mustillo, "Using Predictions and Marginal Effects to Compare Groups in Regression Models for Binary Outcomes," *Sociol. Methods & Res.*, vol. 50, no. 3, pp. 1284–1320, oct. 2018, doi: 10.1177/0049124118799374.
- [31] S. Q. Wali, A. Sali, J. K. Allami y A. F. Osman, "RF-EMF Exposure Measurement for 5G Over Mm-Wave Base Station with MIMO Antenna," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 101448–101463, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3143805.
- [32] A.-K. Lee, S.-B. Jeon y H.-D. Choi, "EMF Levels in 5G New Radio Environment in Seoul, Korea," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 19716–19722, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3054363.
- [33] S. Adda *et al.*, "A Theoretical and Experimental Investigation on the Measurement of the Electromagnetic Field Level Radiated by 5G Base Stations," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 101448–101463, 2020. doi:10.1109/ACCESS.2020.2998448
- [34] S. Aerts *et al.*, "In-Situ Measurement Methodology for the Assessment of 5G NR Massive MIMO Base Station Exposure at Sub-6 GHz Frequencies," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 184658–184667, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2961225.
- [35] Á. Villaescusa-Tebar y C. García-Pardo, "Assessment of 5G RF-EMF Exposure During Large-Scale Public Events via Field Measurements," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 150489-150497, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3602263.
- [36] T. Roy, T. O'Shea, y N. West, "Generative Adversarial Radio Spectrum Networks," in *Proceedings of the ACM Workshop on Wireless Security and Machine Learning*, ACM, New York, NY, USA, pp. 12–15, may. 2019. doi: 10.1145/3324921.3328782.
- [37] R. C. Deo, Z. M. Yaseen, N. Al-Ansari, T. Nguyen-Huy, T. A. M. Langlands, y L. Galligan, "Modern Artificial Intelligence Model Development for Undergraduate Student Performance Prediction: An Investigation on Engineering Mathematics Courses," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 136697–136724, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3010938.
- [38] ITU-R, *Report ITU-R M.2412-0: Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-2020*. Geneva, Switzerland, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2412>
- [39] R. Pawlak, P. Krawiec, y J. Żurek, "On Measuring Electromagnetic Fields in 5G Technology," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 29826–29835, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2902481.
- [40] S. Calonico, M. D. Cattaneo, y M. H. Farrell, "Coverage error optimal confidence intervals for local polynomial regression," *Bernoulli*, vol. 28, no. 4, pp. 2998–3022, nov. 2022, doi: 10.3150/21-BEJ1445.
- [41] C. P. Rosé, E. A. McLaughlin, R. Liu, y K. R. Koedinger, "Explanatory learner models: Why machine learning (alone) is not the answer," *British Journal of Educational Technology*, vol. 50, no. 6, pp. 2943–2958, ago. 2019, doi: 10.1111/bjet.12858.
- [42] I. Abdalla, J. Cai, W. Lu, J. Yu, Z. Li, y B. Ding, "Recent progress on electromagnetic wave absorption materials enabled by electrospun carbon nanofibers," *Carbon*, vol. 213, p. 118300, sep. 2023, doi: 10.1016/J.CARBON.2023.118300.
- [43] E. Håkansson, A. Amiet, S. Nahavandi, y A. Kaynak, "Electromagnetic interference shielding and radiation absorption in thin polypyrrole films," *Eur Polym J*, vol. 43, no. 1, pp. 205–213, ene. 2007, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2006.10.001.
- [44] A. Elhassan, I. Abdalla, J. Yu, Z. Li, y B. Ding, "Microwave-assisted fabrication of sea cucumber-like hollow structured composite for high-performance electromagnetic wave absorption," *Chemical Engineering Journal*, vol. 392, jul. 2020, doi: 10.1016/j.cej.2019.123646.