ISSN: 1692-7257 - Volumen 2 – Número 48 - 2026

ORIGINAL

RCTA
Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada
UNIPAMPLONA

Modelación específica por sitio de la exposición continua a campos electromagnéticos en Bogotá

Site-Specific Modeling of Continuous Electromagnetic Field Exposure in Bogotá

Osnamir Elias Bru-Cordero[1]
Juan Guillermo Popayán Hernández[1]
Cristian David Correa Álvarez[2]

[1] **Universidad Nacional de Colombia, Sede De La Paz, Dirección Académica, La Paz, Cesar, Colombia.**
[2] **Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Departamento de Matemáticas y Estadística, Manizales, Colombia.**

Recibido: 17 abril 2026. Revisado: 25 junio 2026. Aceptado: 24 julio 2026. Publicado: 27 julio 2026.
Autor de correspondencia: Osnamir Elias Bru-Cordero

Cómo citar: O. Elias Bru-Cordero, J. G. Popayán Hernández, and C. D. Correa Álvarez, "Modelación específica por sitio de la exposición continua a campos electromagnéticos en Bogotá", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 2, no. 48, jul. 2026, art. no. 4411, doi: 10.24054/rcta.v2i48.4411

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen:

Este estudio desarrolla y valida un flujo de trabajo reproducible y sensible al sitio para analizar datos continuos de monitoreo de campos electromagnéticos publicados como datos abiertos por la Agencia Nacional del Espectro (ANE) de Colombia. El subconjunto de Bogotá contiene 481.148 mediciones de campo eléctrico de banda ancha promediadas cada seis minutos, recolectadas por nueve sondas fijas entre el 2 de noviembre de 2023 y el 30 de junio de 2024. Tras armonizar las marcas de tiempo y aplicar un filtro de completitud, se analizaron 2.009 registros sonda-día. Para atender la estructura longitudinal del archivo, se compararon dos especificaciones log-lineales de mínimos cuadrados ordinarios con inferencia robusta HC3 con un modelo mixto de intercepto aleatorio, y además se estimó un modelo complementario para el percentil 95 diario. El modelo solo temporal explicó poca variación en la exposición media diaria (R^2 ajustado = 0,007), mientras que el modelo con efectos fijos por sonda capturó la mayor parte de la variabilidad (R^2 ajustado = 0,964). El modelo mixto condujo a la misma interpretación (R^2 marginal = 0,016; R^2 condicional = 0,964), y el modelo p95 conservó una estructura fuertemente dependiente del sitio (R^2 ajustado = 0,951). Los diagnósticos de regresión mostraron no normalidad, heterocedasticidad y autocorrelación residual positiva, pero no observaciones con leverage alto ni una observación influyente capaz de explicar el alto ajuste. El campo máximo observado en seis minutos fue 0,21011 V/m, por debajo del 1% de la referencia contextual pública de 28 V/m. La contribución diferencial del estudio no es afirmar de forma general que las condiciones del sitio importan, sino validar esta estructura de manera específica para Bogotá mediante un flujo auditable de datos abiertos que reporta coeficientes completos, diagnósticos y robustez en la cola superior.

Palabras clave: Monitoreo de campos electromagnéticos; Bogotá; datos abiertos; modelación con efectos fijos; modelos mixtos; diagnósticos de regresión; infraestructura de telecomunicaciones.

Abstract:

This study develops and validates a reproducible, site-sensitive workflow for analyzing continuous electromagnetic field monitoring data published as open data by the National Spectrum Agency (ANE) of Colombia. The Bogotá subset contains 481,148 broadband electric field measurements averaged over six-minute intervals, collected by nine fixed probes between November 2, 2023, and June 30, 2024. After harmonizing timestamps and applying a completeness filter, 2,009 probe-day records were analyzed. To account for the longitudinal structure of the dataset, two ordinary least squares log-linear specifications with HC3 robust inference were compared with a random-intercept mixed-effects model, and an additional model was estimated for the daily 95th percentile. The temporal-only model explained little variation in mean daily exposure (adjusted $R^2 = 0.007$), whereas the model with probe fixed effects captured most of the variability (adjusted $R^2 = 0.964$). The mixed-effects model led to the same interpretation (marginal $R^2 = 0.016$; conditional $R^2 = 0.964$), while the p95 model retained a strongly site-dependent structure (adjusted $R^2 = 0.951$). Regression diagnostics indicated non-normality, heteroscedasticity, and positive residual autocorrelation, but no high-leverage observations or influential observation capable of explaining the high model fit were identified. The maximum six-minute field observed was 0.21011 V/m, below 1% of the public contextual reference value of 28 V/m. The differential contribution of this study is not to make a general claim that site conditions matter, but rather to validate this structure specifically for Bogotá through an auditable open-data workflow that reports complete coefficients, diagnostics, and robustness in the upper tail.

Keywords: Electromagnetic field monitoring; Bogotá; open data; fixed-effects modeling; mixed-effects models; regression diagnostics; telecommunications infrastructure.

INTRODUCCIÓN

La exposición a campos electromagnéticos (EMF) asociada con los sistemas de comunicación inalámbrica continúa siendo un asunto técnico y regulatorio, porque la infraestructura de telecomunicaciones sigue expandiéndose mientras las autoridades de espectro requieren evidencia transparente sobre las condiciones públicas de radiofrecuencia. La Organización Mundial de la Salud plantea la exposición EMF como un reto tanto de ingeniería como de comunicación, y el enfoque de monitoreo de larga duración formalizado en la Recomendación ITU-T K.83 fue creado para apoyar esa necesidad [1]–[3].

En Colombia, esta lógica de monitoreo se refleja en el marco regulatorio sobre radiaciones no ionizantes y en la estrategia de publicación de datos abiertos de la Agencia Nacional del Espectro (ANE), que libera registros continuos de su sistema de monitoreo de campos electromagnéticos[4],[5]. La implicación de ingeniería es que la evaluación de exposición ya no se limita a campañas de campo aisladas; también forma parte de la supervisión de infraestructura, la gobernanza del espectro y la rendición de cuentas técnica.

La literatura internacional muestra que el monitoreo continuo se ha consolidado como una herramienta práctica para la interpretación de ingeniería y la comunicación pública. Las revisiones sobre conceptos de monitoreo EMF, instrumentos de medición y patrones de exposición en microambientes han documentado el valor de las observaciones de banda ancha para caracterizar niveles bajos de exposición pública y comparar estrategias de monitoreo entre contextos [7]–[9]. Los observatorios continuos en Grecia y otros países muestran además que las mediciones fijas de larga duración permiten identificar patrones estables de exposición, modulación estacional y diferencias persistentes entre sitios, manteniéndose por debajo de los niveles públicos de referencia [10]–[12].

Una segunda línea de la literatura enfatiza que los patrones de exposición a radiofrecuencia están determinados por condiciones locales del sitio más que por el tiempo en forma aislada. Los estudios alrededor de estaciones base, sistemas inalámbricos urbanos y áreas residenciales han encontrado de manera repetida que los niveles medidos dependen de la geometría de los transmisores, la forma urbana, la densidad de red y la composición de servicios activos [13]–[15]. Los estudios de modelación han extendido esta idea mediante enfoques geoespaciales, sustitutos y espacio-temporales, mostrando que los datos de exposición son más útiles para decisiones de ingeniería cuando se convierten en modelos estadísticos interpretables y no solo en mediciones aisladas [16]–[20]. Trabajos recientes sobre monitoreo de largo plazo, celdas pequeñas y entornos 5G confirman que la variación temporal existe, pero que la estructura más fuerte suele depender del sitio[12], [23]–[25].

Por tanto, el vacío científico abordado aquí es más específico que la observación general de que los sitios difieren. Para archivos latinoamericanos de datos abiertos todavía existen pocos estudios reproducibles que auditen la semántica de las variables públicas de monitoreo, separen líneas base de sitio de efectos calendario dentro de un mismo entorno metropolitano, reporten salidas completas del modelo y verifiquen si la misma conclusión se sostiene para la exposición rutinaria y para indicadores de cola superior como el percentil 95. Este vacío es relevante porque una liberación nacional de datos abiertos mezcla ciudades, sondas e historias operativas; sin un flujo sensible al sitio y con diagnósticos, los datos públicos pueden resumirse, pero no interpretarse plenamente para decisiones locales de ingeniería.

En consecuencia, este artículo desarrolla un análisis estadístico específico para Bogotá del archivo de monitoreo continuo de la ANE. Los objetivos son caracterizar el subconjunto de Bogotá tras un preprocesamiento transparente, comparar una especificación solo temporal con un modelo de efectos fijos por sonda para la intensidad media diaria del campo eléctrico, evaluar diagnósticos de regresión y robustez longitudinal mediante un modelo mixto, y verificar si un modelo complementario p95 respalda la misma interpretación. La contribución diferencial es un flujo auditable que convierte un archivo colombiano de monitoreo abierto en evidencia interpretable a nivel de sitio para líneas base, detección de anomalías y comunicación técnica pública.

MATERIALES Y MÉTODOS

Conjunto de datos abierto y alcance analítico para Bogotá

Los datos crudos provienen del repositorio gubernamental abierto “Mediciones de exposición a campos electromagnéticos” mantenido por la ANE[5]. El archivo CSV nacional contiene los campos Ubicacion_Sonda, Ciudad_Departamento, Fecha_Medicion, Nivel_Exposicion, Limite_Restrictivo, Porcentaje_Exposicion y Punto_Georreferenciado.

En su forma liberada, el archivo contiene 1.286.346 mediciones de seis minutos obtenidas por 26 sondas distribuidas en 12 etiquetas ciudad-departamento. El presente estudio restringió el análisis al subconjunto de Bogotá porque contiene el mayor número de sondas dentro de un entorno metropolitano común y, por tanto, es más adecuado para evaluar el comportamiento específico de sitio sin mezclarlo con diferencias entre ciudades.

Tras filtrar por identificador de sonda, el subconjunto de Bogotá contiene 481.148 registros de campo eléctrico de banda ancha de seis minutos, recolectados por nueve sondas fijas entre el 2 de noviembre de 2023 y el 30 de junio de 2024. La variable

analítica de interés fue Nivel_Exposicion, definida en la documentación técnica de la ANE como intensidad RMS de campo eléctrico en V/m, medida por equipos isotrópicos de banda ancha bajo la lógica de larga duración de ITU-T K.83[3],[5].

El archivo CSV actual incluye Limite_Restrictivo y Porcentaje_Exposicion, pero esas variables no se utilizaron como objetivos de modelación inferencial porque el archivo codifica un valor restrictivo constante de 2, mientras que el documento soporte archivado describe una referencia pública contextual de 28 V/m para el conjunto publicado[4],[5]. Para evitar propagar transformaciones no documentadas, todo el análisis inferencial se basó en la intensidad de campo medida directamente en V/m. Los porcentajes relativos a 28 V/m se conservaron solo para reporte descriptivo contextual.

Preprocesamiento e indicadores descriptivos

El preprocesamiento de marcas de tiempo convirtió Fecha_Medicion en fechas y horas calendario válidas usando el formato "Y b d I:M:S p"; luego los datos se agregaron por sonda y día calendario. Para cada sonda-día, el flujo calculó el número de registros válidos de seis minutos, la media diaria del campo, la mediana diaria, el percentil 95 diario y el máximo diario. Como la lógica de monitoreo se basa en promedios de seis minutos, un día completo nominal contiene 240 observaciones. Para asegurar ventanas diarias comparables, el análisis retuvo solo sonda-días con al menos 200 registros válidos.

La muestra analítica resultante contiene 2.009 registros sonda-día retenidos, con un promedio de 239,1 mediciones de seis minutos por día retenido. El mes y el día de la semana se derivaron de la fecha calendario. A diferencia de la versión anterior del manuscrito, el p95 diario no se dejó únicamente como indicador descriptivo: se mantuvo en la caracterización descriptiva y también se modeló como objetivo de robustez de cola superior para verificar si la interpretación basada en la media se sostenía para la exposición rutinaria alta.

Modelos estadísticos, justificación longitudinal y diagnósticos

Se estimaron dos modelos log-lineales complementarios para la intensidad media diaria del campo eléctrico. El Modelo A evaluó únicamente efectos calendario, mientras que el Modelo B añadió efectos fijos por sonda para capturar heterogeneidad persistente de sitio. La transformación logarítmica se utilizó porque los valores diarios de campo fueron positivos, asimétricos a la derecha y más fáciles de interpretar de forma multiplicativa después de exponenciar los coeficientes.

$$\log(\text{MeanE_pd} + 10\text{^-6}) = \beta 0 + \gamma m + \delta w + \varepsilon pd. \quad (1)$$

$$\log(\text{MeanE_pd} + 10\text{^-6}) = \beta 0 + \alpha p + \gamma m + \delta w + \varepsilon pd. \quad (2)$$

En las Ecuaciones (1) y(2), p denota la sonda, d el día calendario, m el mes y w el día de la semana. El término αp representa el efecto fijo específico de la sonda, γm el efecto mensual, δw el efecto del día de la semana y εpd el componente no explicado. Se mantuvieron los mínimos cuadrados ordinarios como estimador principal porque el propósito fue estimar líneas base fijas e interpretables dentro de la red de monitoreo observada, no predecir sondas no observadas. Esta formulación de efectos fijos es una estrategia estándar para datos tipo panel cuando se busca remover heterogeneidad invariante en el tiempo[26],[27].

Para atender la naturaleza longitudinal de los datos, el Modelo B no se trató como la única evidencia. Se estimó un modelo mixto de intercepto aleatorio, log(MeanEpd + 10^-6) = β0 + up + γm + δw + εpd, donde up representa un intercepto aleatorio a nivel de sonda, como verificación de robustez sensible al panel. El modelo mixto prueba si la misma interpretación dominada por el sitio aparece cuando la estructura de sonda se representa como efecto aleatorio y no como un conjunto fijo de indicadores de sitio[26].

La observación sobre p95 planteada en la revisión se atendió estimando un tercer modelo con los mismos predictores del Modelo B, pero reemplazando la respuesta por log(p95Epd + 10^-6). Este modelo no sustituye la especificación de media diaria; verifica si la cola superior de la exposición rutinaria sigue la misma estructura de sitio y calendario.

$$\log(\text{p95E_pd} + 10\text{^-6}) = \beta 0 + \alpha p + \gamma m + \delta w + \varepsilon pd. \quad (3)$$

La inferencia de coeficientes para los modelos OLS utilizó matrices de covarianza robustas HC3 frente a heterocedasticidad. Las tablas completas de coeficientes reportan estimaciones, errores estándar robustos, intervalos de confianza del 95%, valores p y efectos exponenciados. La adecuación del modelo se evaluó mediante pruebas de normalidad residual, pruebas de heterocedasticidad, gráficos de residuos frente a ajustados, gráficos Q-Q, residuos studentizados, leverage, distancia de Cook, valores Durbin-Watson agrupados y autocorrelación residual de rezago 1 por sonda. Estos diagnósticos se usan para cualificar la inferencia y no para ocultar limitaciones del modelo[28].

Marco de reproducibilidad

El flujo revisado fue programado en R [22] usando readr, dplyr, lubridate, ggplot2, sandwich, lmtest, broom, tidyr, forcats y nlme. El script actualizado automatiza la importación de datos, el procesamiento de fechas, el filtrado de Bogotá, la agregación sonda-día, el filtro de completitud, los resúmenes descriptivos, la estimación de modelos, la inferencia HC3, la exportación de coeficientes completos, la modelación p95, la robustez con modelos mixtos, las tablas diagnósticas, las figuras diagnósticas y

la exportación de información de sesión. Esta estructura reproducible es importante no solo para la transparencia, sino también porque el conjunto abierto exige auditoría semántica antes de interpretar variables derivadas de límite.

Disponibilidad de materiales y datos

Los datos crudos de monitoreo están disponibles públicamente en el portal colombiano de datos abiertos mantenido por la Agencia Nacional del Espectro [5]. El flujo R revisado específico para Bogotá genera el conjunto derivado sonda-día, las tablas completas de coeficientes, los diagnósticos, las figuras y los metadatos de reproducibilidad que acompañan este manuscrito.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización descriptiva del archivo de monitoreo de Bogotá

La Tabla 1 resume el subconjunto analítico de Bogotá obtenido después de toda la secuencia de preprocesamiento. El archivo específico de ciudad retuvo 481.148 registros de banda ancha de seis minutos y 2.009 observaciones sonda-día casi completas de nueve sondas de monitoreo. La ventana de observación se extendió del 2 de noviembre de 2023 al 30 de junio de 2024, y el día sonda retenido promedio contiene 239,1 mediciones válidas de seis minutos. La media general de la media diaria del campo fue 0,02679 V/m, mientras que la media general del p95 diario fue 0,03791 V/m.

El campo máximo de seis minutos observado en el subconjunto de Bogotá fue 0,21011 V/m, por debajo del 1% de la referencia pública contextual de 28 V/m descrita en el documento soporte archivado de la ANE[4],[5]. Esta magnitud es consistente con estudios de monitoreo continuo que reportan niveles bajos de exposición pública incluso en entornos urbanos densos[10],[15],[21].

Tabla 1: Resumen del subconjunto analítico de Bogotá.

Métrica	Valor
Registros crudos de seis minutos en Bogotá	481,148
Registros sonda-día retenidos	2,009
Sondas distintas en Bogotá	9
Periodo de observación	2023-11-02 to 2024-06-30
Promedio de registros de seis minutos por día retenido	239.1
Media general de la media diaria de E (V/m)	0.02679
Mediana general de la media diaria de E (V/m)	0.01060
Media general del p95 diario de E (V/m)	0.03791
Campo máximo observado en seis minutos (V/m)	0.21011
Máxima media diaria como % de 28 V/m	0.49
Máximo p95 diario como % de 28 V/m	0.60

Fuente: elaboración propia a partir de datos abiertos de la ANE. Los valores relativos a 28 V/m son descriptores contextuales, no objetivos inferenciales.

La característica descriptiva más fuerte del subconjunto de Bogotá es la heterogeneidad entre sondas. La Tabla 2 y la Fig. 1 muestran que Bogota_AEROCIVIL presentó la mayor media diaria de campo (0,12759 V/m), seguida por Bogota_ANE_2 (0,04944 V/m), mientras que Bogota_TES_1 promedió solo 0,00243 V/m. Esto representa una diferencia de más de cincuenta veces entre la sonda con mayor y menor promedio.

Tabla 2: Ordenamiento de sondas de Bogotá según el nivel medio diario de campo eléctrico.

Sonda	Días	Media diaria de E	p95 diario medio	E máxima observada	Media % de 28 V/m
Bogota_AEROCIVIL	242	0.12759	0.15116	0.21011	0.456
Bogota_ANE_2	199	0.04944	0.08642	0.15932	0.177
Bogota_MINTIC	242	0.01679	0.03176	0.12665	0.06
Bogota_BATALLON_BARAYA	207	0.01144	0.01746	0.02435	0.041
Bogota_CAN_CGFM	209	0.01115	0.01699	0.02819	0.04
Bogota_AEROPUERTO_GUAYMARAL	242	0.0091	0.01757	0.02941	0.032
Bogota_ANE	234	0.00386	0.00734	0.03495	0.014
Bogota_BATALLON_USME	208	0.00332	0.00398	0.00749	0.012
Bogota_TES_1	226	0.00243	0.00328	0.00629	0.009

Fuente: elaboración propia. Los porcentajes medios son relativos a 28 V/m.

Los perfiles temporales crudos son informativos, pero deben interpretarse con cautela porque la disponibilidad desigual de sondas puede mezclar efectos temporales con composición de sitio. Los promedios mensuales muestran variación moderada tanto en la media diaria como en el p95 diario, mientras que los promedios por día de la semana muestran niveles más bajos los sábados y domingos que de martes a viernes. Estos patrones motivaron los modelos ajustados que se presentan a continuación.

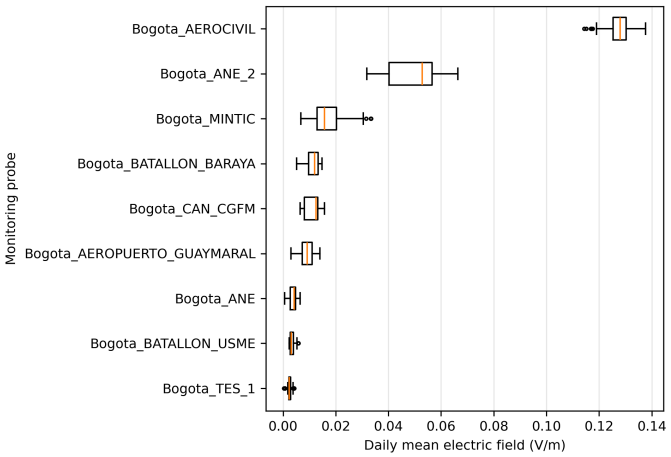

Fig. 1. *Distribución del campo eléctrico medio diario entre sondas de monitoreo en Bogotá.*
Fuente: elaboración propia.

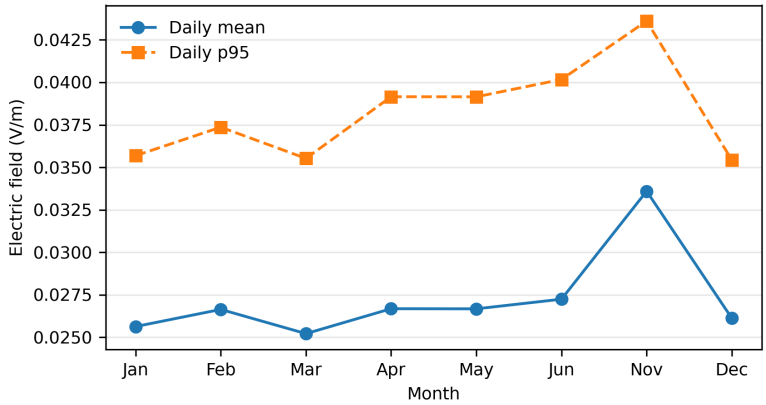

Fig. 2. *Promedios mensuales de la media diaria y del p95 diario del campo eléctrico en Bogotá.*
Fuente: elaboración propia.

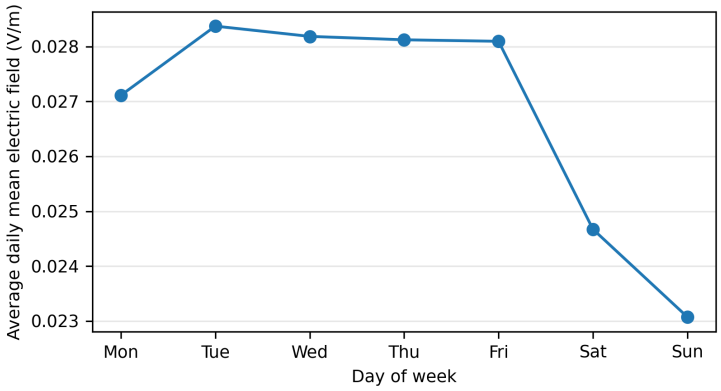

Fig. 3. *Promedios por día de la semana del campo eléctrico medio diario en Bogotá.*
Fuente: elaboración propia.

Modelación solo temporal frente a modelación ajustada por sonda

La Tabla 3 compara los modelos de media diaria y el modelo complementario p95. El Modelo A, que incluyó solo términos de mes y día de la semana, explicó casi ninguna variabilidad de la exposición media diaria (R^2 ajustado = 0,007). El Modelo B, que añadió efectos fijos por sonda, cambió sustancialmente el resultado: el R^2 ajustado aumentó a 0,964 y el error estándar residual bajó de 1,270 a 0,242 en escala logarítmica. El contraste entre las dos especificaciones es el resultado empírico

central del artículo. En Bogotá, la estructura calendario amplia no es suficiente para caracterizar la intensidad media diaria del campo; la mayor parte de la variabilidad explicable está vinculada al sitio de monitoreo.

Tabla 3: Comparación de modelos log-lineales basados en media y p95.

Modelo	Variable objetivo	N	R^2 ajustado	AIC (estilo R)	Error estándar residual
A: mes + día de la semana	Media diaria de E	2009	0.007	6678.6	1.270
B: mes + día de la semana + efectos fijos de sonda	Media diaria de E	2009	0.964	25.9	0.242
C: modelo de cola superior p95 (mes + día + sonda)	p95 diario de E	2009	0.951	640.6	0.282

Los valores AIC siguen la convención de R lm utilizada por el script actualizado. Fuente: elaboración propia.

Las Tablas 4A y 4B presentan la salida completa de coeficientes solicitada durante la revisión. Los coeficientes se reportan en escala logarítmica. Exp(beta) corresponde al factor multiplicativo frente a la categoría de referencia. En el Modelo B, el perfil de referencia es Bogota_AEROCIVIL en enero y lunes.

Tabla 4A: Tabla completa de coeficientes HC3 para el Modelo A: log media diaria de E ~ mes + día de la semana.

Término	Estimación	EE HC3	IC 95%	p	Exp(beta)
Intercepto / referencia	-4.485	0.101	[-4.683, -4.287]	<0.001	0.011
Mes: feb vs ene	0.059	0.104	[-0.146, 0.263]	0.574	1.06
Mes: mar vs ene	-0.003	0.103	[-0.206, 0.200]	0.975	0.997
Mes: abr vs ene	0.035	0.107	[-0.174, 0.244]	0.741	1.036
Mes: may vs ene	0.025	0.106	[-0.182, 0.232]	0.811	1.026
Mes: jun vs ene	0.057	0.107	[-0.154, 0.267]	0.597	1.058
Mes: nov vs ene	-0.158	0.163	[-0.478, 0.161]	0.332	0.854
Mes: dic vs ene	0.014	0.105	[-0.193, 0.220]	0.897	1.014
Día: mar vs lun	0.107	0.107	[-0.103, 0.317]	0.317	1.113
Día: mié vs lun	0.095	0.107	[-0.115, 0.305]	0.375	1.1
Día: jue vs lun	0.083	0.107	[-0.127, 0.292]	0.439	1.086
Día: vie vs lun	0.064	0.107	[-0.146, 0.275]	0.549	1.067
Día: sáb vs lun	-0.156	0.108	[-0.367, 0.055]	0.148	0.856
Día: dom vs lun	-0.282	0.109	[-0.495, -0.070]	0.009	0.754

Categorías de referencia: enero y lunes. Abreviaturas: ene, feb, mar, abr, may, jun, nov, dic; lun, mar, mié, jue, vie, sáb, dom. Fuente: elaboración propia.

Tabla 4B: Tabla completa de coeficientes HC3 para el Modelo B: log media diaria de E ~ mes + día de la semana + efectos fijos de sonda.

Término	Estimación	EE HC3	IC 95%	p	Exp(beta)
Intercepto / referencia	-2.045	0.022	[-2.089, -2.001]	<0.001	0.129
Mes: feb vs ene	0.062	0.016	[0.030, 0.094]	<0.001	1.064
Mes: mar vs ene	0.001	0.018	[-0.035, 0.037]	0.972	1.001
Mes: abr vs ene	0.039	0.018	[0.003, 0.075]	0.032	1.04
Mes: may vs ene	0.029	0.017	[-0.004, 0.062]	0.084	1.029
Mes: jun vs ene	0.031	0.018	[-0.003, 0.066]	0.077	1.032
Mes: nov vs ene	-0.26	0.046	[-0.351, -0.169]	<0.001	0.771
Mes: dic vs ene	0.041	0.021	[-0.000, 0.081]	0.050	1.041
Día: mar vs lun	0.107	0.021	[0.066, 0.149]	<0.001	1.113
Día: mié vs lun	0.105	0.021	[0.064, 0.147]	<0.001	1.111
Día: jue vs lun	0.095	0.022	[0.052, 0.137]	<0.001	1.099
Día: vie vs lun	0.066	0.022	[0.023, 0.109]	0.003	1.068
Día: sáb vs lun	-0.15	0.022	[-0.193, -0.107]	<0.001	0.861
Día: dom vs lun	-0.276	0.024	[-0.323, -0.230]	<0.001	0.759
Sonda: Bogota_AEROPUERTO_GUAYMARAL vs Bogota_AEROCIVIL	-2.677	0.019	[-2.715, -2.640]	<0.001	0.069
Sonda: Bogota_ANE vs Bogota_AEROCIVIL	-3.549	0.021	[-3.590, -3.508]	<0.001	0.029
Sonda: Bogota_ANE_2 vs Bogota_AEROCIVIL	-0.999	0.014	[-1.026, -0.972]	<0.001	0.368
Sonda: Bogota_BATALLON_BARAYA vs Bogota_AEROCIVIL	-2.465	0.016	[-2.497, -2.434]	<0.001	0.085
Sonda: Bogota_BATALLON_USME vs Bogota_AEROCIVIL	-3.707	0.022	[-3.750, -3.665]	<0.001	0.025
Sonda: Bogota_CAN_CGFM vs Bogota_AEROCIVIL	-2.505	0.016	[-2.537, -2.473]	<0.001	0.082
Sonda: Bogota_MINTIC vs Bogota_AEROCIVIL	-2.09	0.02	[-2.129, -2.050]	<0.001	0.124
Sonda: Bogota_TES_1 vs Bogota_AEROCIVIL	-4.048	0.03	[-4.106, -3.990]	<0.001	0.017

Categorías de referencia: enero, lunes y Bogota_AEROCIVIL. Abreviaturas: ene, feb, mar, abr, may, jun, nov, dic; lun, mar, mié, jue, vie, sáb, dom. Fuente: elaboración propia.

Después de ajustar por sonda, los efectos temporales se volvieron más estables e interpretables. Frente a enero, febrero mostró un aumento de 6,4% en la exposición media diaria, abril mostró un aumento de 4,0% y noviembre fue 22,9% menor. Frente al lunes, de martes a viernes se observaron valores más altos, mientras que sábado y domingo fueron menores. Estos efectos son significativos, pero su magnitud es mucho menor que la de los coeficientes de sitio.

Diagnósticos de regresión, robustez p95 y robustez con modelos mixtos

El alto R^2 ajustado del Modelo B exigía verificación diagnóstica. La Tabla 5 muestra que los residuos no siguieron normalidad y que existió heterocedasticidad; por ello se usaron errores estándar robustos HC3 para la inferencia de coeficientes. Los diagnósticos también mostraron autocorrelación residual positiva, con un valor Durbin-Watson agrupado de 0,598 y una mediana de autocorrelación residual de rezago 1 por sonda de 0,641. Esta autocorrelación implica que los valores p temporales

exactos deben interpretarse con cautela, especialmente para efectos de mes. Sin embargo, los diagnósticos de influencia no indicaron que el ajuste estuviera determinado por pocos puntos de alto leverage: el leverage máximo fue 0,0147, por debajo del umbral 2p/n, y la distancia de Cook máxima fue 0,0278.

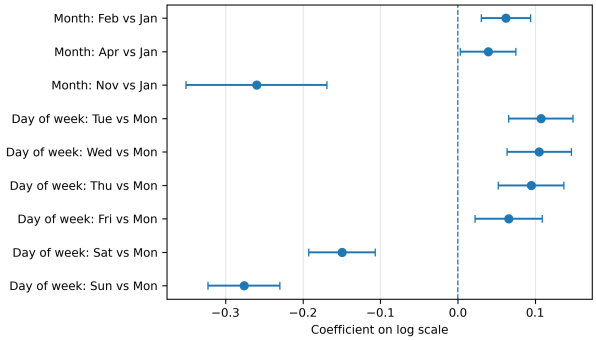

Fig. 4. *Efectos temporales seleccionados del modelo ajustado por sonda. Los coeficientes se muestran en escala logarítmica respecto a enero y lunes. Fuente: elaboración propia.*

Tabla 5: Diagnósticos de regresión para el Modelo B.

Diagnóstico	Resultado
Normalidad residual de Shapiro-Wilk	W = 0.926, p < 0.001
Normalidad residual de Jarque-Bera	JB = 3532.7, skew = -1.194, kurtosis = 9.041, p < 0.001
Heterocedasticidad de Breusch-Pagan	LM = 312.4, p < 0.001
Durbin-Watson agrupado	0.598
Mediana de ACF residual de rezago 1 por sonda	0.641
Rango de ACF residual de rezago 1 por sonda	0.222 to 0.936
Leverage máximo	0.0147
Leverage por encima de 2p/n	0 observaciones (umbral = 0.0219)
Distancia de Cook máxima	0.0278
Distancia de Cook por encima de 4/n	98 observaciones (umbral = 0.0020)
Residuos studentizados |r| > 3	23 de 2009 observaciones

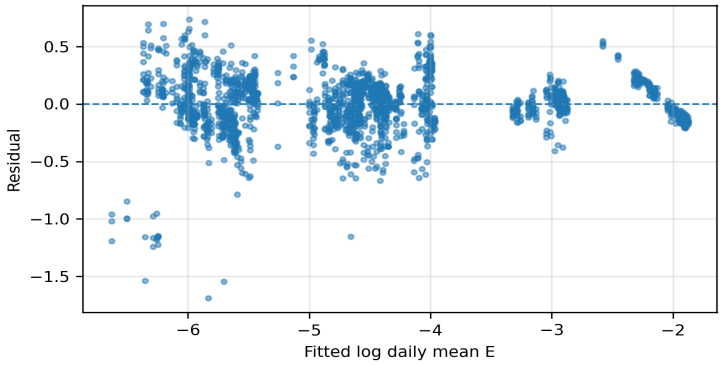

Fig. 5. *Residuos frente a valores ajustados para el Modelo B.*
Los diagnósticos cualifican la inferencia y apoyan el uso de verificaciones robustas y sensibles al panel. Fuente: elaboración propia.

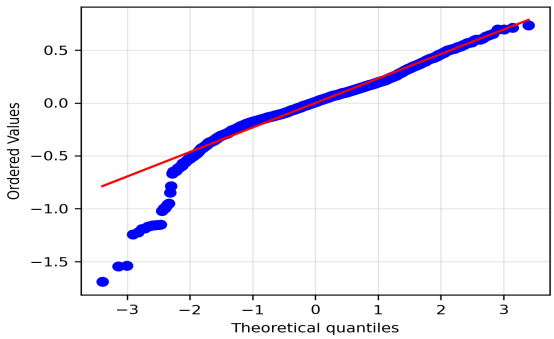

Fig. 6. *Gráfico Q-Q de los residuos del Modelo B.*
Fuente: elaboración propia.

El modelo p95 atendió directamente la preocupación del revisor sobre la exclusión de la métrica de cola superior del análisis inferencial. El modelo p95 alcanzó un R^2 ajustado de 0,951, y sus coeficientes conservaron la misma estructura cualitativa del modelo de media: la exposición de cola superior siguió dominada por diferencias persistentes de sitio, mientras los efectos de día de la semana se mantuvieron visibles y los fines de semana fueron menores. La Tabla 6 muestra coeficientes p95 seleccionados; la tabla completa del modelo p95 se exporta mediante el script R revisado.

Tabla 6: Coeficientes seleccionados del modelo complementario p95.

Término	Estimación	EE HC3	IC 95%	p	Exp(beta)
Mes: feb vs ene	0.07	0.02	[0.030, 0.109]	<0.001	1.072
Mes: abr vs ene	0.079	0.023	[0.034, 0.123]	<0.001	1.082
Mes: nov vs ene	-0.219	0.043	[-0.302, -0.135]	<0.001	0.804
Día: mar vs lun	0.149	0.025	[0.099, 0.199]	<0.001	1.161
Día: dom vs lun	-0.346	0.029	[-0.402, -0.289]	<0.001	0.708
Sonda: Bogota_ANE_2 vs Bogota_AEROCIVIL	-0.629	0.017	[-0.663, -0.595]	<0.001	0.533
Sonda: Bogota_MINTIC vs Bogota_AEROCIVIL	-1.671	0.026	[-1.723, -1.620]	<0.001	0.188
Sonda: Bogota_TES_1 vs Bogota_AEROCIVIL	-3.908	0.029	[-3.965, -3.851]	<0.001	0.02

Variable respuesta: log p95 diario de E. Categorías de referencia: enero, lunes y Bogota_AEROCIVIL. Fuente: elaboración propia.

El modelo mixto de intercepto aleatorio proporcionó una segunda verificación de robustez para la estructura longitudinal. Cuando la sonda se modeló como intercepto aleatorio en lugar de indicadores fijos de sonda, el R^2 marginal asociado únicamente a efectos temporales fue 0,016, mientras que el R^2 condicional que incluye la estructura de sonda fue 0,964. Este resultado es consistente con el Modelo B y confirma que la estructura dominante del archivo de Bogotá es la diferencia persistente entre sitios de monitoreo, más que el mes o el día de la semana por sí solos.

Interpretación técnica de efectos de sitio y tiempo

Bogota_AEROCIVIL fue el sitio con mayor nivel en los análisis descriptivos y ajustados. Como la liberación de la ANE no incluye metadatos resueltos por fuente o por frecuencia, este resultado no debe interpretarse como una estimación causal de un transmisor o servicio específico. Una explicación técnica no causal es que el sitio puede estar ubicado en un entorno radioeléctrico más denso, potencialmente influenciado por infraestructura de telecomunicaciones circundante, comunicaciones aeronáuticas o institucionales, despliegues en azoteas o macroceldas, condiciones de línea de vista y rasgos locales de propagación urbana. Los monitores de banda ancha integran todos los servicios activos dentro de su banda de medición, por lo que una elevación persistente en una sonda fija es técnicamente plausible incluso cuando los niveles absolutos permanecen muy por debajo de los valores públicos de referencia.

La inversión de signo para noviembre también se explica por la composición de sitios. En el perfil mensual crudo, noviembre parece elevado porque la parte inicial del archivo incluye una contribución fuerte de sondas de mayor nivel, en particular Bogota_AEROCIVIL. Una vez el modelo mantiene constante la sonda, noviembre deja de compararse como un promedio simple de ciudad y se compara dentro de la misma línea base de sitio. Por eso el coeficiente ajustado de noviembre se vuelve negativo frente a enero. Esto no es una contradicción, sino un ejemplo de confusión entre efectos calendario y composición del sitio de monitoreo.

El patrón por día de la semana es más estable. De martes a viernes los valores fueron mayores que el lunes, mientras que sábado y domingo fueron menores tanto en la especificación de media como en la p95. Desde una perspectiva de ingeniería, esto respalda la interpretación de que cambios semanales recurrentes en la actividad agregada de red modulan el campo medido. Aun así, los efectos de sonda mucho más grandes muestran que la modulación semanal es secundaria frente a condiciones persistentes de sitio.

Implicaciones de ingeniería, limitaciones y gobernanza de datos

Restringir el análisis a Bogotá cambia el significado práctico de los resultados. El modelo no compara ciudades heterogéneas, sino múltiples monitores fijos dentro de un mismo entorno radioeléctrico metropolitano. Por tanto, las líneas base específicas de sitio son más adecuadas que los promedios generales de ciudad para establecer condiciones normales, comunicar rangos esperados en cada sonda e identificar días que ameritan seguimiento.

Sitios de mayor nivel como Bogota_AEROCIVIL y Bogota_ANE_2 son candidatos naturales para seguimiento de tendencias o auditorías dirigidas, no porque se acerquen a límites públicos restrictivos, sino porque los cambios en el entorno radioeléctrico circundante tienen mayor probabilidad de hacerse detectables allí. En contraste, las sondas de menor nivel ofrecen contextos de referencia útiles para la detección de anomalías y la comunicación pública sobre cuán fuerte puede variar la exposición dentro de una misma ciudad mientras permanece baja en términos absolutos.

La inconsistencia entre la documentación archivada de 28 V/m y los campos actuales Limite_Restrictivo y Porcentaje_Exposicion del CSV refuerza la importancia de modelar la variable medida directamente en V/m en lugar de depender de campos porcentuales derivados. Los archivos públicos de monitoreo son analíticamente valiosos solo si la semántica de sus

variables se audita con el mismo cuidado que el procedimiento estadístico.

Este estudio también tiene limitaciones. El conjunto liberado no proporciona metadatos resueltos por fuente, frecuencia, tráfico, antena o meteorología, por lo que los efectos de sitio no deben interpretarse como estimaciones causales de transmisores o tecnologías específicas. La ventana cubre ocho meses, suficientes para estructura de corto plazo pero no para evolución multianual. La agregación diaria suprime dinámicas intradiarias, y la autocorrelación residual sugiere que trabajos futuros deberían extender el flujo hacia modelos horarios, mínimos cuadrados generalizados, estructuras autoregresivas, análisis de puntos de cambio o monitoreo resuelto por frecuencia conforme existan liberaciones más ricas, especialmente bajo escenarios de despliegue 5G[24],[25].

CONCLUSIONES

Este estudio reorganizó el archivo abierto de monitoreo de la ANE alrededor de un caso metropolitano único: Bogotá. A partir de 481.148 mediciones de banda ancha de seis minutos recolectadas por nueve sondas fijas, el flujo construyó 2.009 registros sonda-día casi completos y los usó para caracterizar niveles de exposición, comparar modelos temporales y ajustados por sitio, evaluar diagnósticos, y verificar robustez mediante p95 y modelos mixtos.

Los resultados descriptivos mostraron que los niveles de campo en Bogotá permanecieron bajos en términos absolutos. El mayor valor de seis minutos observado fue 0,21011 V/m, todavía por debajo del 1% de la referencia pública contextual de 28 V/m descrita en la documentación archivada. Al mismo tiempo, la ciudad exhibió una heterogeneidad pronunciada entre sitios, con Bogota_AEROCIVIL y Bogota_ANE_2 ocupando de forma consistente el extremo superior de la distribución.

Los resultados de modelación precisaron esa interpretación. Un modelo solo temporal explicó casi ninguna variación, mientras que el modelo ajustado por sonda explicó la mayor parte. Los diagnósticos mostraron heterocedasticidad, no normalidad y autocorrelación residual, pero el alto ajuste no fue producido por observaciones de alto leverage. El modelo p95 y el modelo mixto de intercepto aleatorio respaldaron la misma conclusión: la variación temporal existe, pero el comportamiento persistente específico de sitio es la estructura dominante del archivo de Bogotá.

La contribución principal es, por tanto, metodológica y operacional. Los datos continuos abiertos de monitoreo pueden respaldar análisis interpretables sensibles al sitio cuando las reglas de preprocesamiento son explícitas, la semántica de variables se audita, las salidas completas de modelo se reportan y el comportamiento de cola superior se verifica. Para Bogotá, los resultados apoyan líneas base a nivel de sonda para comparación, detección de anomalías y comunicación técnica pública. El flujo R revisado puede reutilizarse para futuras liberaciones de la ANE o extenderse a contextos de monitoreo más ricos cuando estén disponibles metadatos adicionales.

REFERENCIAS

[1] World Health Organization, “Electromagnetic fields,” WHO Health Topics. [Online]. Available: https://www.who.int/health-topics/electromagnetic-fields (accessed Apr. 2025).

[2] World Health Organization, “Radiation: Electromagnetic fields,” WHO Questions and Answers. [Online]. Available: https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-electromagnetic-fields (accessed Apr. 2025).

[3] International Telecommunication Union, “Recommendation ITU-T K.83: Monitoring of electromagnetic field levels,” ITU-T, Geneva, Switzerland, Aug. 2024. [Online]. Available: https://www.itu.int/rec/T-REC-K.83-202408-I

[4] Agencia Nacional del Espectro, “Resolución 774 de 2018 por la cual se establecen los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos,” ANE, Bogotá, Colombia, 2018. [Online]. Available: https://www.ane.gov.co/Documentos%20compartidos/ArchivosDescargables/Normatividad/Radiaciones_no_ionizantes/Resol_774-2018.pdf

[5] Agencia Nacional del Espectro, “Mediciones de exposición a campos electromagnéticos del sistema de monitoreo de campos electromagnéticos: Documento soporte datos abiertos,” ANE, Bogotá, Colombia, 2020. [Online]. Available: https://www.ane.gov.co/Documentos%20compartidos/ArchivosDescargables/datos-abiertos/Documento%20Soporte%20Datos%20Abiertos.pdf

[6] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, “Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz),” *Health Phys.*, vol. 118, no. 5, pp. 483–524, May 2020, doi: 10.1097/HP.0000000000001210.

[7] G. Dürrenberger, J. Fröhlich, M. Röösli, and M.-O. Mattsson, “EMF monitoring—concepts, activities, gaps and options,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 11, no. 9, pp. 9460–9479, Sep. 2014, doi: 10.3390/ijerph110909460.

[8] S. Sagar, S. Dongus, A. Schoeni, K. Roser, M. Eeftens, B. Struchen, M. Foerster, N. Meier, S. Adem, and M. Röösli, “Radiofrequency electromagnetic field exposure in everyday microenvironments in Europe: A systematic literature review,” *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, vol. 28, no. 2, pp. 147–160, Mar. 2018, doi: 10.1038/jes.2017.13.

[9] H. Jalilian, M. Eeftens, M. Ziaei, and M. Röösli, “Public exposure to radiofrequency electromagnetic fields in everyday microenvironments: An updated systematic review for Europe,” *Environ. Res.*, vol. 176, art. no. 108517, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.envres.2019.05.048.

[10] A. Manassas, A. Boursianis, T. Samaras, and J. N. Sahalos, “Continuous electromagnetic radiation monitoring in the environment: Analysis of the results in Greece,” *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 151, no. 3, pp. 437–442, Sep. 2012, doi: 10.1093/rpd/ncs028.

[11] I. Karastergios, A. Gialofas, and E. Karabetsos, "National observatory of electromagnetic fields: National telemetric network for the measurement of high-frequency electromagnetic fields in Greece," *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 188, no. 4, pp. 413–423, Jul. 2020, doi: 10.1093/rpd/ncz301.

[12] A. Manassas, C. Apostolidis, S. Iakovidis, D. Babas, and T. Samaras, "A study of the long term changes in the electromagnetic environment using data from continuous monitoring sensors in Greece," *Sci. Rep.*, vol. 13, art. no. 13784, Aug. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-41034-3.

[13] P. A. Valberg, T. E. van Deventer, and M. H. Repacholi, "Workgroup report: Base stations and wireless networks—radiofrequency (RF) exposures and health consequences," *Environ. Health Perspect.*, vol. 115, no. 3, pp. 416–424, Mar. 2007, doi: 10.1289/ehp.9633.

[14] P. Frei, E. Mohler, G. Neubauer, G. Theis, A. Bürgi, J. Fröhlich, C. Braun-Fahrländer, J. Bolte, M. Egger, and M. Röösli, "Temporal and spatial variability of personal exposure to radio frequency electromagnetic fields," *Environ. Res.*, vol. 109, no. 6, pp. 779–785, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.envres.2009.04.015.

[15] W. Joseph et al., "Comparison of personal radio frequency electromagnetic field exposure in different urban areas across Europe," *Environ. Res.*, vol. 110, no. 7, pp. 658–663, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.envres.2010.06.009.

[16] A. Bürgi, D. Scanferla, and H. Lehmann, "A model for radiofrequency electromagnetic field predictions at outdoor and indoor locations in the context of epidemiological research," *Bioelectromagnetics*, vol. 31, no. 3, pp. 226–236, Apr. 2010, doi: 10.1002/bem.20552.

[17] S. Aerts et al., "Exposure assessment of mobile phone base station radiation in an outdoor environment using sequential surrogate modeling," *Bioelectromagnetics*, vol. 34, no. 4, pp. 300–311, May 2013, doi: 10.1002/bem.21764.

[18] J. Beekhuizen, R. Vermeulen, H. Kromhout, A. Bürgi, and A. Huss, "Geospatial modelling of electromagnetic fields from mobile phone base stations," Sci. Total Environ., vols. 445–446, pp. 202–209, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.12.020.

[19] D. Urbinello, W. Joseph, L. Verloock, L. Martens, and M. Röösli, "Temporal trends of radio-frequency electromagnetic field exposure in everyday environments across European cities," *Environ. Res.*, vol. 134, pp. 134–142, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.envres.2014.07.003.

[20] S. Aerts, W. Joseph, D. Deschrijver, L. Verloock, T. Dhaene, and L. Martens, "Assessment of long-term spatio-temporal radiofrequency electromagnetic field exposure," *Environ. Res.*, vol. 161, pp. 136–143, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.envres.2017.11.003.

[21] S. Sagar et al., "Comparison of radiofrequency electromagnetic field exposure levels in different everyday microenvironments in an international context," *Environ. Int.*, vol. 114, pp. 297–306, May 2018, doi: 10.1016/j.envint.2018.02.036.

[22] R Core Team, "R: A Language and Environment for Statistical Computing," R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2024. [Online]. Available: https://www.R-project.org/.

[23] M. J. van Wyk, J. C. Visser, and C. W. le Roux, "Measurement of EMF exposure around small cell base station sites," *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 184, no. 2, pp. 211–215, Aug. 2019, doi: 10.1093/rpd/ncy201.

[24] S. Aerts et al., "RF-EMF exposure near 5G NR small cells," *Sensors*, vol. 23, no. 6, art. no. 3145, Mar. 2023, doi: 10.3390/s23063145.

[25] S. Liu, K. Tobita, T. Onishi, M. Taki, and S. Watanabe, "Electromagnetic field exposure monitoring of commercial 28-GHz band 5G base stations in Tokyo, Japan," *Bioelectromagnetics*, vol. 45, no. 6, pp. 281–292, Sep. 2024, doi: 10.1002/bem.22505.

[26] J. C. Pinheiro and D. M. Bates, Mixed-Effects Models in S and S-PLUS. New York, NY, USA: Springer, 2000.

[27] J. M. Wooldridge, Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data, 2nd ed. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2010.

[28] J. Fox and S. Weisberg, An R Companion to Applied Regression, 3rd ed. Thousand Oaks, CA, USA: Sage, 2019.

DECLARACIÓN DE USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Durante la revisión de este manuscrito se utilizó un asistente de inteligencia artificial generativa como apoyo para edición lingüística, traducción, organización del documento y preparación de respuestas a revisores. Los resultados numéricos se generaron a partir del conjunto de datos proporcionado mediante código auditable y fueron revisados por los autores. Los autores asumen plena responsabilidad por el contenido final, la interpretación y las conclusiones de esta publicación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Agencia Nacional del Espectro por publicar el conjunto de datos de monitoreo continúo utilizado en este estudio.

FINANCIACIÓN

Esta investigación no recibió financiación externa.

CONFLICTOS DE INTERÉS

No existen

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Siguiendo el marco CRediT (Contributor Roles Taxonomy), las contribuciones de cada autor fueron: Conceptualización: O.B.-C., J.G.P.-H. y C.D.C.-A.; curaduría de datos: O.B.-C. y C.D.C.-A.; análisis formal: O.B.-C. y C.D.C.-A.; financiación: ninguna; investigación: O.B.-C., J.G.P.-H. y C.D.C.-A.; metodología: O.B.-C., J.G.P.-H. y C.D.C.-A.; administración del proyecto: O.B.-C., J.G.P.-H. y C.D.C.-A.; recursos: O.B.-C.; software: O.B.-C., J.G.P.-H. y C.D.C.-A.; supervisión: O.B.-C., J.G.P.-H. y C.D.C.-A.; validación: O.B.-C., J.G.P.-H. y C.D.C.-A.; visualización: O.B.-C.; escritura—borrador original: O.B.-C., J.G.P.-H. y C.D.C.-A.; escritura—revisión y edición: O.B.-C., J.G.P.-H. y C.D.C.-A. Todos los autores leyeron y aprobaron la versión final del manuscrito.