

Predicción temporal de la malaria en Apartadó mediante la caminata al azar probabilista

Temporal prediction of malaria in Apartadó through a probabilistic random walk

JAVIER OSWALDO RODRÍGUEZ-VELÁSQUEZ, SANDRA CATALINA CORREA-HERRERA,
RUBÉN ERNESTO CAYCEDO-BELTRÁN • BOGOTÁ, D.C. (COLOMBIA)
FREDDY ANDRÉS BARRIOS-ARROYAVE, MARGARITA ARBOLEDA-NARANJO • MEDELLÍN (COLOMBIA)

DOI: <https://doi.org/10.36104/amc.2023.2538>

Resumen

Introducción: el análisis del comportamiento de la dinámica de la malaria ha propiciado el desarrollo de métodos acausales que han predicho con alta precisión la cantidad de infectados por esta enfermedad anualmente.

Objetivo: predecir el comportamiento mensual de malaria en el municipio de Apartadó, Colombia mediante la caminata al azar probabilista.

Métodos: se tomaron los valores reportados mensualmente por SIVIGILA, de la cantidad de casos de malaria registrados en Apartadó y se evaluó su analogía con la caminata al azar, luego se estableció la no equiprobabilidad del fenómeno para obtener predicciones mensuales mediante una ecuación de segundo grado.

Resultados: se comprobó la analogía entre la caminata al azar y el comportamiento mensual de la malaria en Apartadó, por lo cual se aplicó la metodología para predecir el valor de la cantidad de casos en meses consecutivos de 2018, alcanzando un acierto predictivo que osciló entre 84.4 y 100%.

Conclusiones: el comportamiento de la malaria en el municipio de Apartadó presenta órdenes matemáticos que permiten su predicción espaciotemporal mediante la caminata al azar probabilista, lo cual permite su uso para orientar la realización de actividades de vigilancia epidemiológica y observar la efectividad de las intervenciones en salud pública. (*Acta Med Colomb* 2023; 48. DOI: <https://doi.org/10.36104/amc.2023.2538>).

Palabras clave: *probabilidad, malaria, predicción.*

Abstract

Introduction: the analysis of the behavior of malaria dynamics has helped to develop causal methods which have very accurately predicted the number of people infected with this disease annually.

Objective: to predict the monthly behavior of malaria in the city of Apartadó, Colombia, using the probabilistic random walk.

Method: the number of cases of malaria registered in Apartadó and reported monthly by SIVIGILA were obtained, and their analogy with the random walk was evaluated. Then, the non-equiprobability of the phenomenon obtaining monthly predictions using a second-class equation was determined.

Results: the analogy between the random walk and the monthly behavior of malaria in Apartadó was proven, and therefore the method was used to predict the number of cases in consecutive months in 2018, achieving a predictive accuracy ranging from 84.4-100%.

Conclusions: the behavior of malaria in the city of Apartadó has mathematical sequences that allow for its spatial-temporal prediction using the probabilistic random walk, allowing it to be used to guide epidemiological surveillance activities and observe the effectiveness of interventions on public health. (*Acta Med Colomb* 2023; 48. DOI: <https://doi.org/10.36104/amc.2023.2538>).

Keywords: *probability, malaria, prediction.*

Dr. Javier Oswaldo Rodríguez-Velásquez: Médico; Dra. Sandra Catalina Correa-Herrera: Psicóloga; Dr. Rubén Ernesto Caycedo-Beltrán: Médico. Especialista en Cirugía General. **Hospital Universitario Nacional de Colombia**. Bogotá, D.C. (Colombia).

Dr. Freddy Andrés Barrios-Arroyave: Médico. Candidato a Doctor en Epidemiología y Bioestadística. Grupo de Investigación en Epidemiología y Bioestadística. Escuela de Graduados Universidad CES; Dra. Margarita Arboleda-Naranjo: Médico. Magíster en Medicina Tropical. Instituto Colombiano de Medicina Tropical. Universidad CES. Apartadó (Colombia).

Correspondencia: Dra. Sandra Catalina Correa-Herrera. Bogotá D.C. (Colombia)

E-Mail: grupoinight2025@gmail.com

Recibido: 29/XI/2024 Aceptado: 22/IX/2023

Introducción

En epidemiología, es habitual la construcción de modelos que relacionan aspectos biológicos y estadísticos de las enfermedades infecciosas para analizar su comportamiento, como se ha realizado con los modelos que estiman el número reproductivo básico (R_0) para estimar la propagación de las enfermedades. Esta clase de información ha sido útil para identificar la carga de la enfermedad y establecer estrategias en salud pública que sirvan para prevenir o limitar su ocurrencia (1, 2). Sin embargo, estos modelos no logran ser generalizables, entre otras limitaciones, porque no permiten su replicación universal.

Estas limitaciones no son ajenas cuando se estudia la epidemia de malaria a nivel mundial (3, 4). Como lo han destacado Li et al. (2011) (5) se puede establecer un mismo modelo de R_0 para la malaria, pudiéndose generar múltiples valores de R_0 dependiendo del método que se utilice, considerando como umbral de referencia el 1, el cual indica la tendencia a que la enfermedad aumente o disminuya su incidencia, si sus valores exceden el umbral o si son cada vez menores al umbral, respectivamente. Además, esta investigación muestra que cuando se implementa el R_0 , este debe estar acompañado de las consideraciones respectivas del método de cálculo implementado y sus supuestos, porque de lo contrario, no tiene sentido su cálculo (5).

Otros estudios en malaria se han basado en el análisis de variables climáticas como los patrones de lluvia, ya que se han descritos variaciones en la transmisión de la enfermedad de manera estacional con respecto a las temporadas de lluvias. De forma similar, la temperatura se ha asociado positivamente para la transmisión cuando está entre 20°C y 30°C. Adicionalmente, se ha demostrado que otros factores pueden estar involucrados en la dinámica de la epidemia, como los cambios en la humedad, puesto que, al ser alta, la longevidad del mosquito es mayor (6).

Con el propósito de superar las limitaciones de los métodos epidemiológicos como los de compartimientos (3) y de otros basados en el análisis climático (6) o que incorporan el aprendizaje de máquinas (7), se han desarrollado metodologías que contribuyen a la predicción del comportamiento de las epidemias a partir de la *caminata al azar*, la cual se ha fundamentado en el estudio del movimiento browniano, en el cual hay movimientos que siguen trayectorias aparentemente caóticas (8-10), y la *teoría de la probabilidad*, con la cual es posible cuantificar la posibilidad de la ocurrencia de un evento (11-13).

La caminata al azar probabilista (en inglés, *Probabilistic Walk*, también conocida como *Random Walk*) definida por Norbert Wiener, es una metodología de amplio alcance que encuentra aplicación en diversas disciplinas, incluyendo matemáticas, estadísticas, física, economía e informática. Se emplea para caracterizar procesos estocásticos en los que un objeto o entidad experimenta movimientos aleatorios en un espacio definido (14, 15).

En la Caminata al Azar Probabilista, un objeto, como una partícula, entidad financiera o agente de inteligencia artificial, efectúa desplazamientos en diferentes direcciones de forma aleatoria. Cada desplazamiento individual se determina siguiendo una distribución de probabilidad específica. Estas caminatas pueden ser de dos tipos: discretas, donde los movimientos se realizan en pasos discretos, como movimientos arriba o abajo en una red, o continuas, donde los movimientos se desarrollan en una dirección continua, como un punto que se desplaza en un plano sin restricciones (16, 17).

La utilidad de la caminata al azar probabilista se extiende a diversas disciplinas para caracterizar procesos aleatorios con el fin de comprender, predecir y optimizar una amplia gama de fenómenos y sistemas, tales como: modelado de difusión molecular (18), economía y finanzas (19), predicción meteorológica (20), análisis de redes sociales y datos (21), procesamiento de imágenes y visión por computadora (22), optimización y búsqueda (23), biología y ecología (24), o criptografía, entre otros (25).

Producto de este enfoque teórico, se ha desarrollado un método de caminata al azar probabilista, el cual permitió realizar la primera predicción temporal del número de infectados por malaria en Colombia para el año 2007, con un porcentaje de acierto de 95.6% (26). Resultados similares se observaron en la predicción temporal del número de infectados por dengue (27) y en otros eventos de interés, como la mortalidad secundaria a lesiones causadas por accidentes de tránsito (28).

La efectividad mostrada por la metodología a nivel nacional y anual para predecir la dinámica del número de casos de malaria en Colombia, sugiere su posible escalamiento a menores rangos de tiempo y a nivel municipal. Por lo anterior, el propósito de esta investigación consiste en aplicar esta metodología para predecir el número de casos por mes para el año 2018 en el municipio de Apartadó, Departamento de Antioquia, y contrastar los valores predichos con los valores reportados por el sistema nacional de vigilancia epidemiológica de Colombia (SIVIGILA), para establecer su porcentaje de acierto y validar su utilidad y su posible aplicabilidad como herramienta de ayuda en la toma de decisiones de salud pública a nivel municipal.

Material y métodos

Tipo de estudio

Se efectuó un estudio observacional retrospectivo en el cual se implementó un método predictivo de series temporales mensuales, que relacionaron el número de infectados por malaria en el municipio de Apartadó, Antioquia, Colombia en 2018.

Población

Se tomaron los valores mensuales de los casos de malaria confirmados y notificados, entre 2015 y 2019, procedentes del municipio de Apartadó, Antioquia, a partir de los datos

compilados en el sistema de vigilancia epidemiológica colombiano (SIVIGILA) y de la Dirección Seccional de Salud de Antioquia. La razón por la cual se escogieron los datos de estos años es que han sido previamente revisados por entidades que realizan vigilancia epidemiológica, posibilitando así el estudio de la epidemia de malaria a partir de los agentes encargados de esta temática.

Procedimiento

Inicialmente, se estableció una analogía geométrica entre la caminata al azar y el comportamiento de los valores mensuales de los casos de infectados, de acuerdo con el método establecido previamente por Rodríguez et al. (2009, 2017, 2020) (26-28). Posteriormente, se establecieron longitudes de las variaciones mensuales del número de infectados mediante la ecuación 1:

$$L = \sqrt{(X_0 - X_1)^2 + (Y_0 - Y_1)^2} \text{ Ecuación 1}$$

Para la ecuación anterior, X_0 y Y_0 se refieren a las coordenadas del valor correspondiente al mes inicial y X_1 y Y_1 las del mes posterior. Las coordenadas en X son iguales en todos los meses debido a que el movimiento se estudia solamente en el eje de las Y , es decir, la variación de infectados.

Consecuentemente, se estableció un espacio de probabilidad en el cual las longitudes halladas con la ecuación 1 se consideraron como eventos de probabilidad, calculados con la ecuación 2, la cual establece una división entre la longitud del número de infectados mensual sobre la sumatoria de todas las longitudes.

$$P(L) = \frac{\text{Longitud cambio del número de infectados mensual}}{\text{Total longitudes}} = \frac{L}{TL} \text{ Ecuación 2}$$

Luego, se calculó la probabilidad de la cantidad de infectados mensuales $P(N)$ a través de la ecuación 3, en la cual se cuantificó una división del valor del número de infectados mensual de un mes específico dividido entre la suma total de estos cambios.

$$P(N) = \frac{\text{Valor del número mensual de infectados de malaria}}{\text{Total de casos reportados en el año}} \text{ Ecuación 3}$$

Para determinar la equiprobabilidad de dinámica de los valores encontrados, se recurrió a la desviación media cuadrática mediante la ecuación 4:

$$P(Rn) = \frac{\text{Número casos mensual}}{\text{Totalidad de casos}} \pm \frac{1}{2\sqrt{N}} \text{ Ecuación 4}$$

El comportamiento de los valores calculados de desviación media cuadrática permitió identificar si, en este caso,

la dinámica de la malaria en Apartadó presentó valores de infectados más probables de presentarse que otros, posibilitando la obtención de predicciones como se ha detallado en la literatura (14-16).

Seguidamente, se procedió a desarrollar un espacio de probabilidad que consideró los tres valores anteriores del mes a predecir y con los cuales se calculó un promedio aritmético que fue sustituido en la ecuación 1, la cual se despejó hasta obtener la ecuación 5 en su forma cuadrática, la cual arrojó dos posibles soluciones:

$$Y_{\text{Mes a predecir}} = \frac{2Y_{\text{Mes anterior}} \pm \sqrt{(-2Y_{\text{Mes anterior}})^2 - 4\{Y_{\text{Mes anterior}}^2 + (X_1 - X_0)^2 - [P(L)^2 \times (TL)^2]\}}}{2} \text{ Ecuación 5}$$

Correspondiendo PL al promedio aritmético de la probabilidad para los tres últimos meses, y TL a la suma de las tres longitudes de los tres meses previos.

Finalmente, con el propósito de establecer cuál fue el valor más probable entre las dos soluciones obtenidas, se generó un espacio de probabilidad, en el cual se estudió la ocurrencia de disminuciones o aumentos del número de infectados con respecto al mes anterior en intervalos temporales bimensuales y trimestrales. Adicionalmente, para confirmar la capacidad predictiva del método, se comparó el valor predicho con respecto a los valores reportados por el SIVIGILA y cuantificar su precisión predictiva. Este procedimiento fue realizado, con el fin de validar la capacidad del método para predecir el comportamiento del número de infectados durante 2018, concretamente, el comportamiento mensual consecutivo durante seis meses (último semestre del año).

Resultados

Las notificaciones mensuales de casos de malaria en Apartadó, para el año 2018, oscilaron entre 20 y 87, mientras que las longitudes calculadas lo hicieron entre 2 y 47, a las cuales correspondieron probabilidades de las longitudes con valores de 0.002-0.0636. Los valores de desviación media cuadrática variaron entre -0.0017-0.049 con una diferencia de valores esperados de -0.01-0.015 (Tabla 1), indicando que el comportamiento de la epidemia de malaria en Apartadó es no equiprobable.

Posteriormente, se determinó la capacidad predictiva de la metodología establecida, realizando para ello predicciones de seis meses consecutivos durante 2018. Así, se predijeron los valores de la cantidad de infectados entre julio a diciembre. Tras realizar los cálculos exhibidos en la Tabla 1, se procedió a aplicar la ecuación 5, con la cual se obtuvieron los rangos entre los cuales se encuentra el valor a predecir, los cuales correspondieron a 11-83, 24-88, 18-62, 33-51, 37-51 y 37-43, respectivamente.

Luego de analizar los incrementos y descensos para los meses consecutivos descritos, los cuales correspondieron

Tabla 1. Valores de longitudes, probabilidades y desviaciones medias de Apartadó durante 2018.

Mes	Infectados	L	P(L)	P(N)	DMC+	DMC-	DMC+ P(N)	DMC- P
Enero	41	12	0.016	0.018	0.029	0.008	0.011	-0.011
Febrero	34	7	0.009	0.015	0.026	0.005	0.011	-0.011
Marzo	20	14	0.019	0.009	0.019	-0.002	0.011	-0.011
Abril	40	20	0.027	0.018	0.028	0.007	0.011	-0.011
Mayo	87	47	0.064	0.039	0.049	0.028	0.011	-0.011
Junio	47	40	0.054	0.021	0.031	0.010	0.011	-0.011
Julio	56	9	0.012	0.025	0.035	0.014	0.011	-0.011
Agosto	40	16	0.022	0.018	0.028	0.007	0.011	-0.011
Septiembre	42	2	0.003	0.019	0.029	0.008	0.011	-0.011
Octubre	44	2	0.003	0.020	0.030	0.009	0.011	-0.011
Noviembre	40	4	0.005	0.018	0.028	0.007	0.011	-0.011
Diciembre	49	9	0.012	0.022	0.032	0.011	0.011	-0.011

L: longitudes; P: probabilidad; DMC: desviación media cuadrática.

Tabla 2. Porcentajes predichos para seis meses consecutivos de 2018.

	Meses de 2018					
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Reportado	56	40	42	44	40	49
Predicho	65	40	51	47	47	41
Porcentaje de acierto	86.40%	100%	82.60%	94.60%	84.50%	84.40%

a: incremento, descenso, incremento, incremento, descenso y incremento, respectivamente; se realizó un promedio aritmético entre el promedio obtenido, el rango y su límite superior si del espacio de probabilidad anterior se obtuvo un aumento, o con el promedio y el límite inferior cuando se observó una disminución. De esta manera, se obtuvieron valores de predicciones correspondientes a 65, 40, 42, 44, 40 y 49, que, al ser comparados con los valores reportados para los mismos meses, de 56, 40, 51, 47, 47 y 41, se obtuvieron aciertos de 86.4%, 100, 82.6, 94.6, 84.50 y 84.4%, respectivamente, lo cual indicó un acierto predictivo promedio de 89% (Tabla 2).

Discusión

Esta es la primera investigación publicada con datos locales en la cual se aplicó una metodología predictiva de la dinámica mensual de la malaria en el municipio de Apartadó, Antioquia, Colombia para el 2018, a partir de la caminata al azar probabilística y usando series temporales construidas

con registros históricos del SIVIGILA. Esta metodología tuvo un acierto para predicciones consecutivas de seis meses (segundo semestre de 2018) de 89%. Es importante destacar que fue posible obtener estas predicciones porque inicialmente se verificó que, a nivel municipal, la epidemia de malaria conservó características de comportamientos matemáticos que se pudieron analizar mediante la caminata al azar.

Apartadó es un municipio ubicado en la región del Urabá antioqueño, que recientemente se ha afectado por la malaria endémica. De acuerdo con datos publicados por el Boletín epidemiológico del Instituto Nacional de Salud, para la semana epidemiológica 43 de 2022 (23 a 29 de octubre), Apartadó fue uno de los dos municipios en condición de brote por malaria en el país, con 30 casos notificados esperados y 62 casos notificados observados (29). Así mismo, de acuerdo con informes de la Dirección Seccional de Salud de Antioquia, para el año 2018 Apartadó fue uno los municipios más afectados por la malaria en el Departamento de

Antioquia, junto con El Bagre, Vigía del Fuerte, Remedios, Zaragoza y otros 16 municipios en condición de alto riesgo por malaria (30).

Los resultados de este estudio indican que la dinámica de la enfermedad en el municipio posee un orden matemático y físico, lo cual implica que puede ser abordada desde metodologías con un enfoque acausal con fines predictivos, pudiendo ser de utilidad para los organismos de vigilancia en salud pública, orientando hacia las intervenciones efectivas para disminuir la carga y las dinámicas de transmisión de la enfermedad. Al respecto, se ha demostrado que la utilidad en salud pública de esta metodología parte de la exploración que se hace del crecimiento espacio-temporal de una epidemia. Se ha evidenciado que un sistema simple de paseo aleatorio genera una dinámica no trivial en comparación con los modelos epidemiológicos tradicionales (31). Esta metodología también puede ser útil para calcular numéricamente diagramas de fases que caracterizan el comportamiento a largo plazo de las epidemias. Asimismo, la dependencia funcional del número reproductivo básico R_0 sobre los parámetros que definen este tipo de modelos revelan el papel de las fluctuaciones espaciales y, si la información se complementa con caminata al azar, podría conducir a una aplicación o expresión novedosa para R_0 (31), lo cual puede ser de utilidad para la toma de decisiones por parte de las autoridades de vigilancia del municipio. Adicionalmente, si se requiere, puede prestarse atención a simulaciones aleatorias, que, a futuro, se efectúen en relación con los fenómenos de transmisión interregional del contagio.

Los resultados de este trabajo fueron socializados con autoridades académicas locales en medicina tropical y con personal que toma decisiones en vigilancia en salud pública a nivel municipal. La discusión de la metodología y de los resultados ha suscitado gran interés para complementar los análisis que se hacen a partir de otras metodologías como el índice endémico, series de tiempo, construcción de canales endémicos, entre otros.

Con anterioridad, esta metodología había sido implementada para predecir la dinámica de las epidemias de malaria y dengue a nivel nacional en el año 2007, alcanzando precisiones predictivas superiores a 90% en ambos casos (26, 27). Estos trabajos implementaban el análisis de las dinámicas anuales, es decir, los casos reportados en todo un año por las entidades de vigilancia epidemiológica para todo el territorio nacional. A diferencia, esta investigación realiza una aproximación predictiva conservando su condición de alta precisión, en una escala espacial y temporal menor, al contar con predicciones realizadas mensualmente de manera consecutiva para un municipio de Colombia. De esta manera, esta investigación muestra que la metodología puede ser aplicada a contextos más reducidos y que potencialmente apuntaría hacia las necesidades de los organismos de vigilancia epidemiológica a nivel municipal.

Para estudiar el comportamiento de las enfermedades infecciosas, de lo cual la malaria no es una excepción, se

han desarrollado múltiples abordajes complejos y que buscan atribuir relaciones casuales, como, por ejemplo, las variaciones de temperatura o los comportamientos socioculturales con respecto al aumento o disminución de casos en un país o región, entre otros factores. Por ejemplo, se han realizado investigaciones basadas en el aprendizaje de máquinas para establecer análisis de la variabilidad climática y así predecir si los casos en una región de un país aumentarán o disminuirán (32, 33) o incluso en escalas espaciales menores en centros urbanos poblados (34). Estos métodos han demostrado ser altamente precisos y responden a algunas deficiencias de los modelos de compartimentos (1); sin embargo, pueden encontrarse limitados por la cantidad de datos que requieren para establecer una predicción (1) o inclusive, esta podría verse restringida a la región específica en donde se ha aplicado el método, por lo cual no es posible conciliar una metodología aplicable a nivel mundial.

Esta investigación, por su parte, demuestra que pueden establecerse análisis simplificados del comportamiento de diferentes enfermedades, que pueden ser endémicas en diferentes territorios, como es el caso de la malaria en Colombia. Así mismo, estos análisis pueden realizarse a nivel nacional y municipal. De igual manera, este método, al estar estandarizado, es objetivo y reproducible, por lo cual no hay necesidad de usar un software especializado ni de contar con datos retrospectivos o históricos extensivos. Sin embargo, se resalta la importancia de efectuar más investigaciones que permitan confirmar la efectividad y precisión del método para predecir el comportamiento de las epidemias en escalas temporales y espaciales distintas.

El tipo de investigación aquí desarrollado sigue el pensamiento de la física teórica contemporánea y la matemática, lo cual ha permitido generar métodos predictivos en otras áreas del conocimiento biomédico, como por ejemplo, en infectología, donde se ha diseñado un método que permite predecir recuentos de linfocitos CD4+ (35). Similarmente, se han desarrollado métodos diagnósticos que relacionan la geometría fractal y euclidiana en el contexto de la re-estenosis arterial y el cáncer cervical (36, 37). Complementariamente, mediante la geometría fractal y los sistemas dinámicos, se ha diagnosticado la dinámica cardíaca neonatal y del adulto (38, 39). Estos estudios demuestran que las aproximaciones teóricas son de utilidad para abordar los fenómenos biomédicos por medio de métodos matemáticos objetivos y reproducibles.

Dentro de las limitaciones a considerar se encuentra la posibilidad de que los informes en las bases de datos de SIVIGILA presenten subregistros, lo que podría resultar en pequeñas variaciones en los valores de las predicciones finales. No obstante, dado que se ha identificado un patrón general en la dinámica, es factible que las propias predicciones a futuro puedan ayudar a detectar momentos potenciales de subregistro. Esto podrá ser viable gracias a que la metodología se basa en principios físicos y matemáticos, lo que significa que los resultados no dependen de modelos multifactoriales. En contraste, al adoptar un

enfoque no causal, se simplifica el análisis del fenómeno (40) y se utiliza una dinámica probabilística no causal para hacer predicciones sobre el número de personas afectadas por malaria en el municipio.

Agradecimientos

Este producto es derivado del proyecto INV.022021.002, financiado por la Universidad CES de Medellín, Colombia, a quienes agradecemos, especialmente a la Dirección de Investigación, Innovación y Empresarismo, por su apoyo a nuestras investigaciones. También agradecemos al Instituto Colombiano de Medicina Tropical sede Apartadó, adscrito a la Universidad CES.

Igualmente, extendemos nuestro agradecimiento al Hospital Universitario Nacional de Colombia, especialmente al Doctor Giancarlo Buitrago, director del Instituto de Investigaciones Clínicas de la Universidad Nacional de Colombia-Hospital Universitario Nacional de Colombia, por su apoyo en esta investigación.

Referencias

- Ridenhour B, Kowalik JM, Shay DK. Unraveling R0: considerations for public health applications. *Am J Public Health*. 2014;**104**(2):e32-41. doi: 10.2105/AJPH.2013.301704.
- Delamater PL, Street EJ, Leslie TF, Yang YT, Jacobsen KH. Complexity of the Basic Reproduction Number (R0). *Emerg Infect Dis*. 2019;**25**(1):1-4. doi: 10.3201/eid2501.171901.
- Griffin JT. Is a reproduction number of one a threshold for Plasmodium falciparum malaria elimination? *Malar J*. 2016;**15**(1):389. doi: 10.1186/s12936-016-1437-9.
- Carter R, Karunaweera ND. The role of improved housing and living environments in malaria control and elimination. *Malar J*. 2020;**19**(1):385. doi: 10.1186/s12936-020-03450-y.
- Li J, Blakeley D, Smith RJ. The failure of R0. *Comput Math Methods Med*. 2011;2011:527610. doi: 10.1155/2011/527610.
- Kumar V, Mangal A, Panesar S, Yadav G, Talwar R, Raut D, et al. Forecasting Malaria Cases Using Climatic Factors in Delhi, India: A Time Series Analysis. *Malaria Research and treatment*. 2014; 482851.
- Wang M, Wang H, Wang J, Liu H, Lu R, Duan T, et al. A novel model for malaria prediction based on ensemble algorithms. *PLoS One*. 2019;**14**(12):e0226910. doi: 10.1371/journal.pone.0226910.
- Cattoni D, Ozu M, Chara O. Ruidos en la naturaleza. En: *ANALES AFA*. 2004. p. 294-9.
- Lavenda B. El movimiento browniano. *Investig Cienc*. 1985;103:36-46.
- Weiss G. Aspects and Applications of the Random Walk (Random Materials & Processes S.). Amsterdam: North-Holland; 2005.
- Laplace P. Ensayo filosófico sobre las probabilidades. Barcelona: Altaza; 1995. 12-15 p.
- Mood AM, Graybill FA, Boes DC. Introduction to the Theory of Statistics. 3rd ed. Introduction to the Theory of Statistics. Singapore: Mc. Graw-Hill; 1974.
- Feynman RP, Leighton RB, Sands M. Probability. In: Physics Vol 1: Mechanics, radiation, and heat. Wilmington: Addison-Wesley Publishing Company; 1964. p. 1-11.
- Brown J. Stochastic Processes in Random Environments. New York: Wiley; 2010.
- Lawler GF. Intersections of Random Walks. Springer Science & Business Media; 2013. 219 p.
- Bhattacharya R, Waymire EC. Random Walk, Brownian Motion, and Martingales. Springer Nature; 2021. 396 p.
- Lawler GF, Limic V. Random Walk: A Modern Introduction. Cambridge University Press; 2010. 376 p.
- Ibe OC. Elements of Random Walk and Diffusion Processes. John Wiley & Sons; 2013. 280 p.
- Smith AB, Johnson CD. Random Walk Models in Finance. *J Finance*. 2005;**32**(5):721-738. doi: 10.1016/j.jfinance.2005.07.001
- DeSole T, Tippet MK. Forecast Comparison Based on Random Walks. *Monthly Weather Review*. 2016;**144**(2):615-26. doi: 10.1175/MWR-D-15-0218.1
- Nakajima K, Shudo K. Random Walk Sampling in Social Networks Involving Private Nodes. *ACM Trans Knowl Discov Data*. 2023;**17**(4):51:1-51:28. doi: 10.1145/3561388
- Jha SK, Bannerjee P, Banik S. Random Walks based Image Segmentation Using Color Space Graphs. *Procedia Technology*. 2013;**10**:271-8. doi: 10.1016/j.protecy.2013.12.361
- Bisnik N, Abouzeid AA. Optimizing random walk search algorithms in P2P networks. *Computer Networks*. 2007;**51**(6):1499-514. doi: 10.1016/j.comnet.2006.08.004
- Ahmed DA, Benhamou S, Bonsall MB, Petrovskii SV. Three-dimensional random walk models of individual animal movement and their application to trap counts modelling. *Journal of Theoretical Biology*. 2021;**524**:110728. doi: 10.1016/j.jtbi.2021.110728
- Fan H, Lu H, Zhang C, Li M, Liu Y. Cryptanalysis of an Image Encryption Algorithm Based on Random Walk and Hyperchaotic Systems. *Entropy*. 2022;**24**(1):40. doi: 10.3390/e24010040
- Rodríguez-Velásquez JO, Prieto-Bohórquez SE, Correa-Herrera SC, Pérez-Díaz CE, Soracipa-Muñoz MY. Dinámica de la epidemia de malaria en Colombia: Predicción probabilística temporal. *Rev Salud Pública*. 2017;**19**(1):91-100. doi: 10.15446/rsap.v19n1.48203
- Rodríguez J, Correa C. Predicción Temporal de la Epidemia de Dengue en Colombia: Dinámica Probabilista de la Epidemia Temporal. *Rev Salud Pública*. 2009;**11**(3):443-53.
- Rodríguez J, Jattin J, Soracipa Y. Probabilistic temporal prediction of the deaths caused by traffic in Colombia. *Accident Analysis and Prevention*. 2020;**135**:105332. doi: 10.1016/j.aap.2019.105332
- Instituto Nacional de Salud, Ministerio de Salud y Protección Social. BES Boletín Epidemiológico Semanal Semana epidemiológica 43. Bogotá: 2022. Ed: Instituto Nacional de Salud. [Documento oficial en internet, acceso el 13 de junio 2023]; 28 págs. Disponible en: https://www.ins.gov.co/buscador-eventos/BoletinEpidemiologico/2022_Bolet%C3%ADn_epidemiologico_semana_43.pdf
- Dirección Seccional de Salud de Antioquia, Gobernación de Antioquia. Antioquia continúa la lucha contra la malaria. Medellín: 2018. Ed: Gobernación de Antioquia. [Documento oficial en internet, acceso el 13 de junio 2023]; 5 pant. Disponible en: <https://www.dssa.gov.co/index.php/historico-noticias/item/842-antioquia-continua-la-lucha-contra-la-malaria>
- Chu A, Huber G, McGeever A, Veytsman B, Yllanes D. A random-walk-based epidemiological model. *Sci Rep*. 2021;**11**(1):19308. doi: 10.1038/s41598-021-98211-5
- Nkiruka O, Prasad R, Clement O. Prediction of malaria incidence using climate variability and machine learning. *Informatics in medicine Unlocked*. 2021;**22**:100508. doi: 10.1016/j.imu.2020.100508
- Harvey D, Valkenburg W, Amara A. Predicting malaria epidemics in Burkina Faso with machine learning. *PLoS One*. 2021;**16**(6):e0253302. doi: 10.1371/journal.pone.0253302
- Brown BJ, Murescu P, Przybylski AA, Caccioli F, Oyinloye G, Elmi M, et al. Data-driven malaria prevalence prediction in large densely populated urban holoendemic sub-Saharan West Africa. *Scientific Reports*. 2020;10:15918. doi: 10.1038/s41598-020-72575-6
- Rodríguez JO, Prieto SE, Correa C, Pérez CE, Mora JT, Bravo J, Soracipa Y, Alvarez LF. Predictions of CD4 lymphocytes' count in HIV patients from complete blood count. *BMC Med Phys*. 2013;**13**(1):3. doi: 10.1186/1756-6649-13-3
- Rodríguez JO, Prieto SE, Correa C, Bernal PA, Puerta GE, Vitery S, Soracipa Y, Muñoz D. Theoretical generalization of normal and sick coronary arteries with fractal dimensions and the arterial intrinsic mathematical harmony. *BMC Med Phys*. 2010;**10**:1. doi: 10.1186/1756-6649-10-1
- Prieto S, Rodríguez J, Correa C, Soracipa Y. Diagnosis of cervical cells based on fractal and Euclidian geometrical measurements: Intrinsic Geometric Cellular Organization. *BMC Med Phys*. 2014;**14**(2):1-9. doi: 10.1186/1756-6649-14-2
- Rodríguez J, Prieto S, Flórez M, Alarcón C, López R, Aguirre G, et al. Physical-mathematical diagnosis of cardiac dynamic on neonatal sepsis: predictions of clinical application. *J. Med. Med. Sci*. 2014;**5**(5):102-108. doi: 10.14303/jmms.2014.070
- Rodríguez J, Prieto S, Correa C, Domínguez D, Pardo J, Mendoza F, et al. Clinic application of a cardiac diagnostic method based on dynamic systems theory. *Res. J. Cardiol*. 2017;**10**(1):1-7
- Spitzer F. Principles of Random Walk. Springer Science & Business Media; 2013. 419 p.

