

DETERMINACIÓN EPIDEMIOLÓGICA DE LA MALARIA BAJO MODELO MATEMÁTICO EN ZONAS DE BAJAMAR SOBRE LA COSTA PACÍFICA COLOMBIANA

Hector Julian Malpica Salcedo *, Gabriel Murillo Barragán[†], José Fernando Gomez Bonilla[‡]
hj.malpica@uniandes.edu.co *, gs.murillo@uniandes.edu.co[†], José
jf.gomezb1@uniandes.edu.co[‡]
Departamento de Ingeniería Biomédica, **Universidad de los Andes**

Resumen

La minería de oro, mayormente ilegal, ha incrementado de manera significativa en Colombia durante las últimas décadas llevando a un crecimiento proporcional en los casos de malaria reportados[1], por lo que se hace necesario evaluar los diferentes factores en el comportamiento epidemiológico de la malaria que influyan en el desarrollo de esta en zonas afectadas por la minería ilegal, particularmente haciendo un enfoque en una zona tropical con escasez de políticas estatales como lo es el pacífico colombiano. A partir de esta premisa y considerando un planteamiento matemático, se formula un modelo epidemiológico con un abordaje metapoblacional, basado en el modelo matemático de Ross-McDonald[2], donde se evalúan los diferentes factores epidemiológicos y migratorios que influyen en el comportamiento de la malaria en dos parches asociados por la migración: un parche urbano y un parche rural en la zona de bajamar caracterizado por la presencia de minería ilegal. A partir del escenario metapoblacional planteado se obtiene que las dinámicas migratorias si influyen de manera directa con el aumento de infección por malaria en el sistema, y que a una mayor tasa de migración de la ciudad a la zona minera (caracterizado por el aumento de la minería ilegal) existe un aumento directamente proporcional en la cantidad de humanos y mosquitos infectados en el sistema.

Keywords— Malaria, minería ilegal, pacífico colombiano, comportamiento epidemiológico, modelo matemático, Ross-McDonald, migración .

1. INTRODUCCIÓN

LA MALARIA es una enfermedad parasitaria de transmisión vectorial endémica en muchas partes del mundo. Esta enfermedad se ha vuelto predominante en muchos países tropicales debido a la facilidad que hay en estos de una acelerada replicación del vector debido a diversos factores medioambientales.[3] La malaria es la quinta causa de muerte en el mundo en cuanto a enfermedades infecciosas (después de infecciones respiratorias, VIH/SIDA, enfermedades diarreicas y tuberculosis) [4]. En Colombia se hace un problema de salud pública importante debido a diferentes factores como lo pueden ser la diversidad de pisos térmicos de carácter predominantemente tropical, así como la falta de control en políticas públicas para la disminución del vector transmisor de la enfermedad y de manera subsecuente, el desconocimiento en los factores epidemiológicos ponderantes que llevan a un crecimiento acelerado en la propagación de la enfermedad. Es por ello que se hace necesario el planteamiento de un modelo matemático a partir del cual

sea cuantificable la influencia de los distintos parámetros epidemiológicos que hacen que se dé una propagación acelerada de la enfermedad.

La malaria es causada por un parásito del género *Plasmodium* y es transmitida de manera vectorial principalmente. La transmisión vectorial se da principalmente por picaduras de un mosquito hembra maduro del género *Anopheles* que inicia el ciclo de sostenimiento del parásito.[5] Existen 5 especies conocidas de parásitos protozoarios del género *Plasmodium* que infectan los glóbulos rojos de la sangre e inoculan la infección en el huésped humano, siendo estas 5 especies: *P. falciparum*, *P. malariae*, *P. vivax* y *P. ovale* (dos especies). La infección por malaria se da comúnmente y en mayor proporción por *P. vivax* y *P. falciparum*. Entre los síntomas asociados a la infección están dolor de cabeza, cansancio, fatiga, malestar abdominal y dolores musculares y articulares, generalmente seguidos por fiebre, escalofríos, transpiración, pérdida de peso, vómitos y malestar general. [6] El riesgo de contraer malaria es significativo en más de 100 países de carácter tropical, subtropical o con

climas templados. De acuerdo con cifras de la Organización Mundial de la Salud (OMS), anualmente existen alrededor de 241 millones de casos, como es notable en la cifra reportada en el año 2020 y de estos casos existe una estimación letal de alrededor de 640 mil muertes.[7] En Colombia, en el año 2020 se reportaron alrededor de 67 mil casos lo cual representa una cifra de alarma en cuanto a salud pública dado que en el país existen alrededor de 25 millones de personas con riesgo de contagiarse y la prevalencia de casos sigue en aumento. [8] [9]

En América, países de carácter tropical como Brasil, Colombia, Venezuela y Surinam han tenido un aumento considerable en los casos de malaria en las últimas décadas, y estudios afirman que estos pueden estar asociados con un aumento en la minería ilegal. [1] La minería, y principalmente la minería ilegal, favorece que haya ambientes más amigables para la proliferación del vector asociado a la transmisión de malaria, debido al aumento de sitios con aguas estacas propicios para el crecimiento de las larvas de los mosquitos del género *Anopheles*. Lo anterior, en conjunto con la circulación de individuos humanos infectados debido al aumento de la migración propiciado por la minería ilegal propicia en gran manera el aumento de casos reportados de malaria en las regiones tropicales más afectadas. Regiones como el pacífico colombiano donde hay poca presencia de políticas estatales de salud pública para la promoción y prevención, y a donde a su vez hay climas que propician el crecimiento del mosquito y la acumulación de aguas estacas son las más afectadas.

En el Chocó, la cercanía a la costa pacífica, el fenómeno del niño, y el aumento de la minería ilegal hacen que este departamento sea uno de los más afectados en Colombia por la infección por malaria con *P. falciparum*. Por lo que se hace necesario encontrar medidas de prevención para mitigar los diferentes factores epidemiológicos que puedan ayudar al incremento de casos en la región. Para ello se plantea un modelo matemático que pueda servir en la determinación de los factores más influyentes en el aumento de casos de malaria; Diversos modelos matemáticos se han planteado para hacer un análisis epidemiológico de la malaria desde los días de Ross-McDonald en 1911, donde se plantea un modelo de infección de humanos susceptibles que posterior a su periodo de infección pueden recuperarse, considerando dinámicas Humano-Mosquito.[2]

Toda la problemática presentada con sus incidencias y prevalencias a nivel global y para los propósitos

de este artículo nos lleva a la pregunta de investigación: ¿Cómo se comporta la proporción de infectados en una población humana sometida a la malaria, a partir de factores migratorios en zonas del bajamar en la costa pacífica colombiana aledañas a zonas de minería ilegal, a partir de la variación en diferentes parámetros epidemiológicos?

2. DIAGRAMA DE CAJAS

Se plantea entonces de acuerdo con la pregunta de investigación un modelo dinámico para la transmisión de malaria entre humanos y mosquitos, considerando parches para la dispersión espacial en el caso de la zona urbana y en el caso de zona rural, mas específicamente la zona de la minería ilegal en la zona de bajamar en el pacífico colombiano, en un escenario metapoblacional basado en el modelo de Ross-McDonald con diferentes actores implicados como los mostrados a continuación:

Variables de estado	
Denotación	Descripción
S_1	Humanos Susceptibles en Zona Urbana
S_2	Humanos Susceptibles en Zona Minera
S_1^m	Mosquitos Susceptibles en Zona Urbana
S_2^m	Mosquitos Susceptibles en Zona Minera
I_1^m	Mosquitos infectados en Zona Urbana
I_1^m	Mosquitos infectados en Zona Minera
E_1	Humanos Expuestos en Zona Urbana
E_2	Humanos Expuestos en Zona Minera
I^h	Humanos infectados

De acuerdo con lo anterior, se plantea el diagrama representativo del modelo matemático a considerar con el propósito de resolver la pregunta de investigación. Este diagrama es el mostrado en la figura 1

A partir del diagrama realizado se plantean las ecuaciones representativas del modelo a continuación:

$$\begin{aligned}
 \frac{dS_1}{dt} &= \beta I^h - \frac{S_1 I_1^m}{N_1^m} \cdot c_1 \cdot a_1 - \tau P S_1 + \eta S_2 \\
 \frac{dE_1}{dt} &= \frac{S_1 I_1^m}{N_1^m} c_1 a_1 - \sigma E_1 + \eta E_1 - \tau P E_1 \\
 \frac{dI^h}{dt} &= \sigma E_1 - \beta I^h + \sigma E_2 \\
 \frac{dS_2}{dt} &= \tau P S_1 - \frac{S_2 I_2^m}{N_2^m} c_2 \cdot a_2 - \eta S_2 \\
 \frac{dE_2}{dt} &= \tau P E_1 + \frac{S_2 I_2^m}{N_2^m} c_2 a_2 - \eta E_2 - \sigma E_1
 \end{aligned} \tag{1}$$

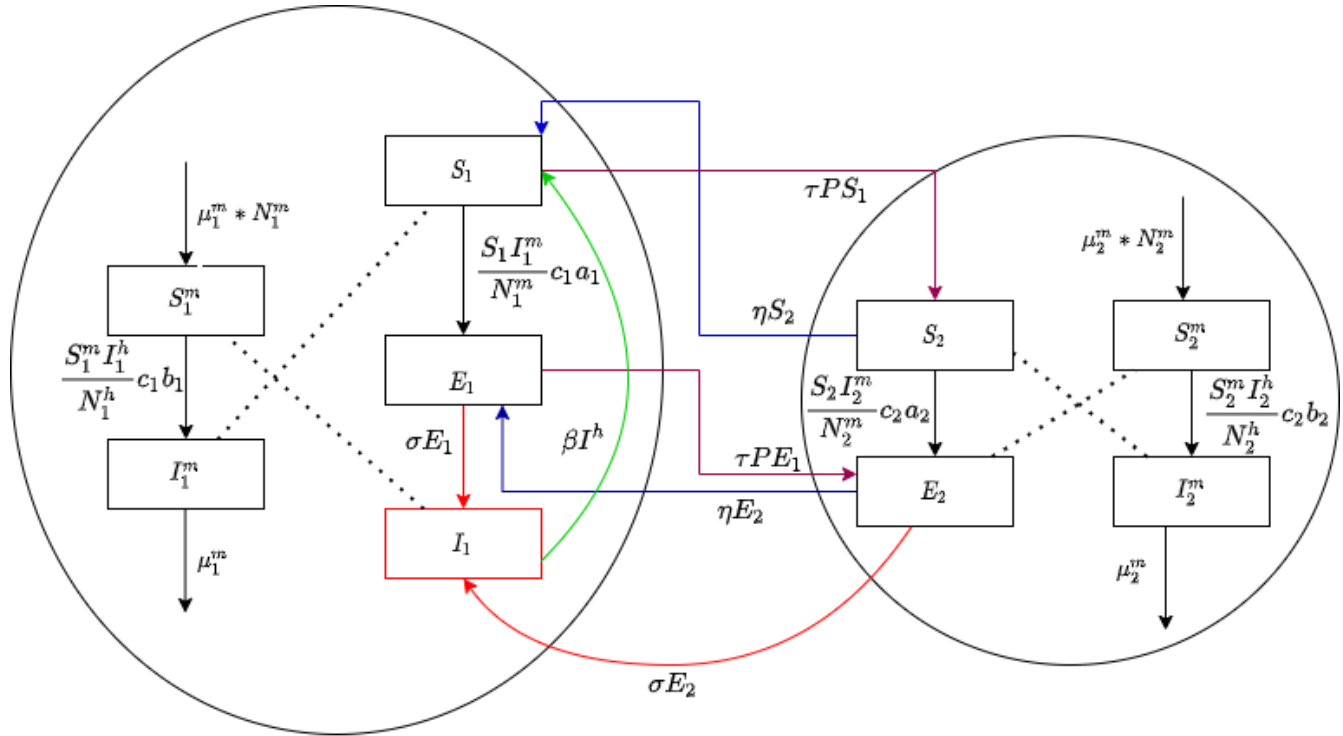


Figura 1: Diagrama de cajas representativo del modelo

Para las poblaciones de mosquitos se tienen las siguientes ecuaciones características:

$$\begin{aligned}
 \frac{dS_1^m}{dt} &= \mu_1 (S_1^m + I_1^m) - \frac{S_1^m I_1^h}{N_1^h} c_1 b_1 - \mu_1 S_1^m \\
 \frac{dI_1^m}{dt} &= \frac{S_1^m I_1^h}{N_1^h} c_1 b_1 - \mu_1 I_1^m \\
 \frac{dS_2^m}{dt} &= \mu_2 (S_2^m + I_2^m) - \frac{S_2^m I_2^h}{N_2^h} c_2 b_2 - \mu_2 S_2^m \\
 \frac{dI_2^m}{dt} &= \frac{S_2^m I_2^h}{N_2^h} c_2 b_2 - \mu_2 I_2^m
 \end{aligned} \quad (2)$$

Para las ecuaciones planteadas en la parte superior se consideran algunos supuestos como:

1. Todos los mosquitos considerados son hembra adultos, por lo anterior, no se tienen tasas de incubación en larvas.
2. No se considera la posibilidad de infección en el tiempo de traslación entre los parches.
3. La población de humanos toma características demográficamente homogéneas.
4. No se toma en cuenta un periodo de recuperación de mosquitos, pues se considera que una vez acabado su periodo infeccioso estos mueren.
5. No se considera un factor de muerte natural en la población debido a que la ventana de tiempo sobre la cual se desarrollará el modelo no es significativa.

6. La población de humanos toma características demográficamente homogéneas.
7. No se considera transmisión vertical, ni transmisión por contacto de sangre, infusiones o trasplantes; Únicamente se considera la transmisión por picaduras.
8. No se considera la posibilidad de infección en el tiempo de traslación entre los parches.
9. Los infectados de las zonas mineras son llevados a un centro médico asistencial en la zona urbana.
10. Las personas no viven en la mina.
11. No se consideran controles como vacunación o tratamientos antipalúdicos.
12. Se considera que las dinámicas poblacionales de los mosquitos son independientes de factores estacionales y de temperatura.
13. No se consideran dinámicas vitales para humanos, se tiene que ambos sistemas son cerrados.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PLANTEAMIENTO

Para responder a la pregunta de investigación planteada con el modelo realizado se considera un modelo sobre el cual existe una dinámica mosquito-humano para dos meta-poblaciones usando dos parches: urbano-rural. Se consideran poblaciones cerradas de mosquitos que pueden infectar a los humanos de sus respectivas zonas a diferentes tasas,

pues se tiene que la probabilidad de infección, la tasa de picadura y la cantidad de mosquitos son mayores en el escenario rural propiciado por la minería ilegal, que en el escenario urbano. Ahora bien, se considera que los humanos pueden infectarse a diferentes tasas en las dos meta-poblaciones, habiendo mayor probabilidad de infección en las zonas aledañas a la mina, que en las zonas urbanas. Después de picados, los humanos de ambas meta-poblaciones pasan a ser expuestos. La diferencia es que cumplida la etapa de expuestos, tanto los humanos infectados en la zona rural como los humanos infectados en la zona urbana permanecen en la zona urbana al momento de presentar síntomas debido a que estos requieren ayuda médica asistencial. Ahora bien, considerando las dinámicas interparche, se tienen tasas de migración entre los escenarios espaciales caracterizados principalmente porque aunque si va un gran porcentaje de humanos de la mina a la zona urbana, no todos los humanos de la zona urbana van a la mina. por lo que matemáticamente hablando $\tau > \eta$ para que tenga sentido en el escenario planteado. Esta dinámica migratoria dada por las tasas τ y η son el objetivo principal de la pregunta de investigación. Pues se quiere observar como a través de la migración de los humanos entre los parches puede incrementar o no el número de infectados en el modelo planteado.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Dada la naturaleza de la pregunta de investigación, se infiere que haya una incidencia directa en la propagación de la enfermedad entre los humanos dada la migración de los humanos de la zona aledaña a la zona minera (rural). Esto se observa en la Fig.2, donde se evidencia que hacia el día 120 hay una inflexión en la población urbana de tal forma que se da un aumento abrupto de los infectados y una disminución de los susceptibles y de los expuestos, lo que indica que cada vez existen más personas que son picadas por los mosquitos infectados y que desarrollan la enfermedad debido a la alta cantidad de mosquitos que supone múltiples picaduras en un solo día para sólo una persona. En cuanto a la zona rural, se observa que la población tiende a 0 por el hecho de que casi ninguna persona permanece en dicha zona durante un día(se considera que la tasa de migración a la ciudad no es total (0.95) debido a que un trabajador pueda permanecer más de un día trabajando en la zona minera sin ir a su hogar). Por lo tanto, las personas van a la zona de minería y son picadas

pero hace que no se aumente el número de infectados en dicha zona por el regreso de individuos a la zona urbana. Dado que los infectados no pueden trabajar, se evidencia que la mayoría de la población se ve infectada porque aquellos individuos que no se encuentran contagiados pasan a visitar a la zona minera donde son picados por los mosquitos y por la alta tasa de picadura en la zona rural, presentan mayor probabilidad de contagiarse. De esta forma, en el infinito el número de contagiados es mayor respecto a los demás actores. En cuanto a los mosquitos, para ambas poblaciones se evidencia un mismo comportamiento: A medida que transcurre el tiempo, el número de mosquitos infectados aumenta y los mosquitos susceptibles disminuyen. El número de mosquitos susceptibles no llega a ser 0 dado que constantemente se encuentran entrando mosquitos en el sistema que pasan a ser directamente susceptibles, tal como se evidencia en Fig.2

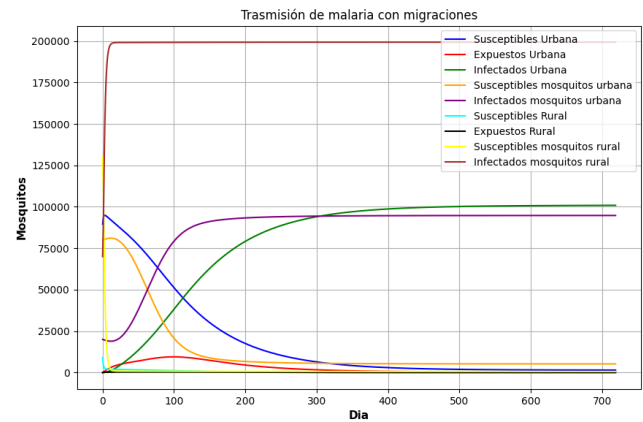


Figura 2: Resultados de la simulación del modelo para 720 días teniendo en cuenta los parámetros de migración

Cuando se ignoran las tasas de migración de la zona rural a la urbana y viceversa ($\tau; \eta$), es decir, cuando son 0; se observa en comportamiento presentado en la Fig.3 en la que se evidencia que hacia el día 70 la población de infectados en la zona urbana comienza a aumentar de forma exponencial así como los demás actores para las dos metapoblaciones. Este comportamiento caótico se debe a que al volver los valores 0, el balance de masa no se conserva y hace que las poblaciones no crezcan ni disminuyan hacia cierto límite.

Profundizando en la influencia de las variables migratorias τ , η y P , se observa que para el caso de τ cuando es mayor a 0.75 la población de susceptibles en la zona rural se estabiliza en 0 en el día 20, lo cual

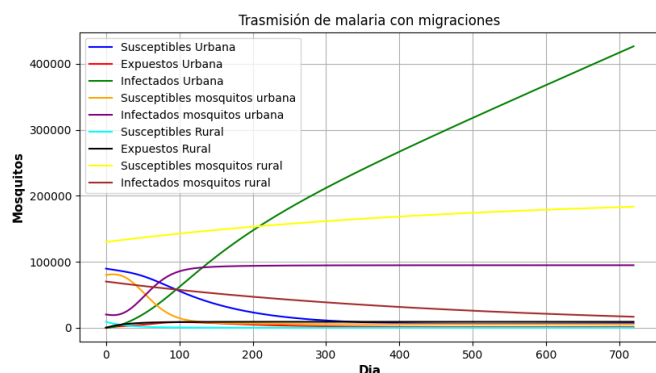


Figura 3: Resultados de la simulación del modelo para 720 días teniendo en cuenta los parámetros de migración

no tiene sentido biológico dado que al tener una población cerrada se obtienen poblaciones negativas para los infectados y los expuestos por el número tan elevado de susceptibles durante los primeros 20 días. Sin embargo se obtuvo algo interesante y es que se observa que a medida que se aumenta el valor de τ , la población de expuestos disminuye y se estabiliza más lentamente. Para los expuestos en la zona urbana, a medida que τ oscila entre valores comprendidos entre 0.45 y 0.65 la población se estabiliza hacia el día 500; que es mucho más apresurado respecto a los demás valores los cuales al llegar el día 720 no se han estabilizado y continúan disminuyendo. En cuanto a los infectados, se observa que a medida que aumenta τ , el número de individuos aumenta en el tiempo. Adicionalmente, la población se estabiliza más apresuradamente cuando τ aumenta. (estas gráficas las pueden detallar en la sección de Anexos). Para el caso de η , se observa que a medida que el valor del parámetro aumenta, la población de susceptibles disminuye de forma más lenta en el tiempo y aumenta el tiempo de estabilización. Además, cuando éste parámetro es menor a la tasa de migración de la zona urbana a la rural, las poblaciones en general aumentan negativamente y de forma exponencial, por lo tanto pierde sentido biológico el modelo. En la población de expuestos, a medida que η disminuye la población se estabiliza más rápidamente y al final del periodo la población no se estabiliza en 0. Lo que no pasa para valores altos de η , donde el valor de los expuestos tienden a 0. Y para los infectados, el número de individuos al final del tiempo aumenta a medida que se disminuye η y se estabiliza más rápido cuando η aumenta. Por lo anterior, la influen-

cia de las migraciones entre zonas que se refleja en el aumento de la minería ilegal influye de forma directa en el aumento de casos de malaria en una población urbana.

5. CONCLUSIONES

La malaria es considerada un serio problema de salud pública en Colombia, especialmente en el departamento del Chocó, debido a la cantidad de casos causados por el vector *Anopheles*, que transmite los parásitos *Plasmodium*. La transmisión focal y variable se ha modificado por las interacciones socio-económicas y políticas que ocurren en las zonas rurales de bajamar, en especial caso: el incremento de la práctica de minería no regulada. Del mismo modo, las características geográficas del territorio rural y del casco urbano favorecen la difusión, transmisión. En este artículo se abordan las interacciones migratorias que se desarrollan en las zonas mediante el desarrollo de un modelo matemático para ejemplificar la epidemiología. Del mismo modo, se evidencia que las interacciones de los humanos con los vectores en las zonas de desarrollo de minería afectan positivamente la proliferación de la malaria en la región; en este caso se reduce el tiempo para el cual se alcanza un punto de inestabilidad de las poblaciones infectadas y susceptibles. Así mismo, como se evidencia en los anexos, la variabilidad de los parámetros influye en el comportamiento de la enfermedad parasitaria en la población de estudio. Los resultados cuantitativos del modelo indican que se cumplió el objetivo de realizar una aproximación teórica verificando que los parámetros migratorios influyen, y más importante se verifica de manera cuantitativa en el cómo influyen, en la propagación de malaria en el escenario metapoblacional planteado.

6. TRABAJO A FUTURO

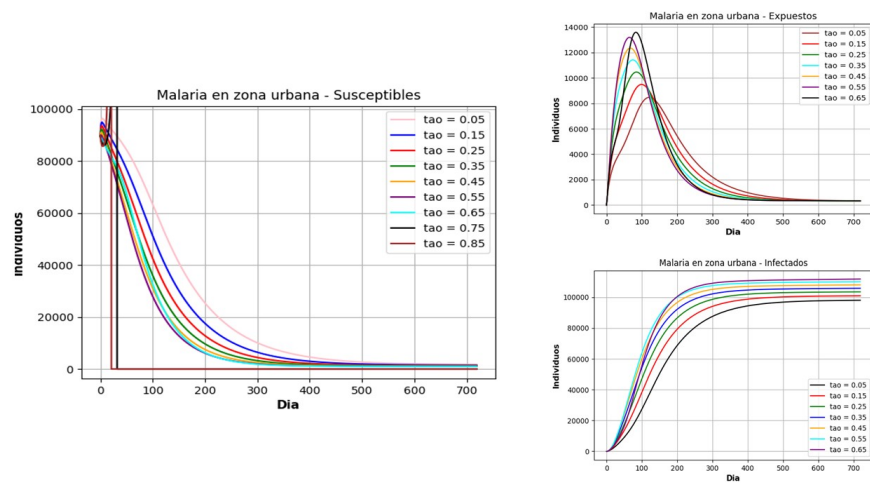
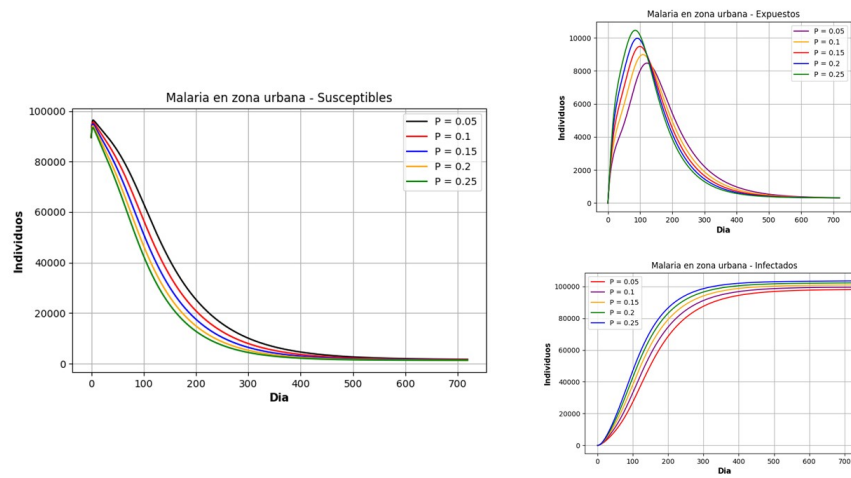
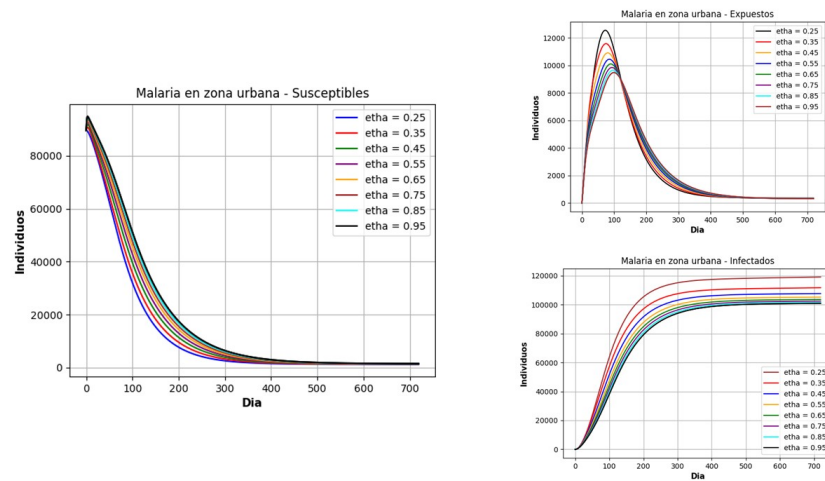
Con el fin de obtener un modelo ideal, lo más cercano a lo que sucede en la naturaleza se implementaría en un trabajo a futuro algunas dinámicas que podrían afectar a la propagación más o menos acelerada de la malaria, y que sean fieles a la realidad de la minería ilegal en el pacífico colombiano. De acuerdo con lo anterior, se podrían tener en cuenta múltiples características importantes de la malaria en la región, como bien lo pueden ser un comportamiento estacional que podría afectar al crecimiento o disminución de la población de mosquitos en determinadas épocas del año, este se

podría incorporar al modelo a partir de variaciones trigonométricas que simulen el comportamiento climático en zona tropical que pueda llevar a la acumulación de aguas estacas que propicien la propagación de mosquitos en el Chocó. Además, habría que considerar otros factores como la vacunación o el uso de medicamentos en un tratamiento antipalúdico que puedan aumentar las tasas de inmunidad en la población, así como disminuir el periodo infeccioso en el cual un infectado puede contagiar a otros individuos, respectivamente. En el modelo actual se consideraron muchos supuestos importantes como los mencionados anteriormente, entre los cuales destacan la utilización de una población homogénea y cerrada tanto para mosquitos como para humanos, por lo que en un trabajo futuro, se podrían considerar poblaciones más realistas: como por ejemplo la presencia de diferentes estadios en las etapas de maduración de los mosquitos considerando los tiempos de incubación y crecimiento en el cual estos se transforman de larvas a mosquitos maduros capaces de infectar; Con respecto a la población de humanos sería menester considerar que no todas las poblaciones sufren de la infección por malaria de la misma forma, como por ejemplo los adultos mayores y niños pueden desarrollar la infección de una manera más grave, y durar más tiempo infectados lo cual puede incrementar los puntos focales de infección dentro de las comunidades a considerar. Finalmente sería importante considerar la muerte por infección y muerte natural de los humanos en un mayor tiempo evaluado.

REFERENCIAS

- [1] A. Castellanos, P. Chaparro-Narváez, C. D. Morales-Plaza, A. Alzate, J. Padilla, M. Arévalo, and S. Herrera, "Malaria in gold-mining areas in colombia," *Memorias do Instituto Oswaldo Cruz*, vol. 111, pp. 59–66, 2016.
- [2] S. Mandal, R. R. Sarkar, and S. Sinha, "Mathematical models of malaria-a review," *Malaria journal*, vol. 10, no. 1, pp. 1–19, 2011.
- [3] G. A. Ngwa and W. S. Shu, "A mathematical model for endemic malaria with variable human and mosquito populations," *Mathematical and computer modelling*, vol. 32, no. 7-8, pp. 747–763, 2000.
- [4] A. Mojeeb, I. K. Adu, and C. Yang, "A simple seir mathematical model of malaria transmission," *Asia Res J Math*, pp. 1–27, 2017.
- [5] J. E. Kim, Y. Choi, and C. H. Lee, "Effects of climate change on plasmodium vivax malaria transmission dynamics: A mathematical modeling approach," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 347, pp. 616–630, 2019.
- [6] M. de Salud y protección Social, "Diagnóstico y tratamiento de malaria cerebral," 2020.
- [7] W. H. Organization *et al.*, "World malaria report 2021," 2021.
- [8] M. de Salud y Protección Social, "Boletín de prensa no 510 de 2021," *Colombia avanza en meta de eliminación de la malaria a 2030*, Apr 2021.
- [9] J. I. Galindo-Buitrago, R. A. Hernández-Rodríguez, and W. G. Jiménez-Barbosa, "Epidemiological behavior of malaria on the pacific coast of the department of nariño, colombia, 2003-2017," *Revista Ciencias de la Salud*, vol. 18, no. 3, pp. 4–18, 2020.
- [10] J. B. Keven, M. Katusele, R. Vinit, D. Rodríguez-Rodríguez, M. W. Hetzel, L. J. Robinson, M. Laman, S. Karl, and E. D. Walker, "Vector composition, abundance, biting patterns and malaria transmission intensity in madang, papua new guinea: assessment after 7 years of an llin-based malaria control programme," *Malaria journal*, vol. 21, no. 1, pp. 1–15, 2022.
- [11] H.-F. Huo and G.-M. Qiu, "Stability of a mathematical model of malaria transmission with relapse," in *Abstract and Applied Analysis*, vol. 2014, Hindawi, 2014.
- [12] J. Ochoa, L. Osorio, and L. Osorio, "Epidemiología de malaria urbana en quibdó, chocó. biomédica [internet]. 2006 jun 1 [cited 2017 oct 11]; 26 (2): 278."

7. ANEXOS

Figura 4: Análisis de sensibilidad para τ Figura 5: Análisis de sensibilidad para P Figura 6: Análisis de sensibilidad para η

PARAMETROS				
Símbolo	Descripción	Valor	Unidad []	Referencia
β	Tasa de recuperación de humanos infectados a susceptibles.	0.00017	dia^{-1}	[4]
σ	Tasa de desarrollo de la infección de humanos expuestos que se infectan.	0.05	dia^{-1}	[4]
μ_1	Tasa de nacimiento y muerte de los mosquitos en la ciudad.	0.0075	dia^{-1}	[4]
c_1	Tasa de picadura en la ciudad.	0.46	dia^{-1}	[10]
c_2	Tasa de picadura en la mina.	0.7	dia^{-1}	asumida
α_1	Probabilidad de transmisión de la infección de un mosquito infectado a un humano susceptible en la ciudad	0.022	adimensional	[11]
b_1	Probabilidad de transmisión de la infección de un humano infectado a un mosquito susceptible en la ciudad	0.3	adimensional	asumida
α_2	Probabilidad de transmisión de la infección de un mosquito infectado a un humano susceptible en la mina	0.15	adimensional	asumida
b_2	Probabilidad de transmisión de la infección de un humano infectado a un mosquito susceptible en la mina	0.883	adimensional	[11]
μ_2	Tasa de nacimiento y muerte de los mosquitos en la mina.	0.002	dia^{-1}	asumida
P	Proporción de aumento de la migración de la ciudad a la mina	0.15	adimensional	asumida
τ	Tasa migratoria de la ciudad a la mina	0.15	dia^{-1}	asumida de [1]
η	Tasa migratoria de la mina a la ciudad	0.95	dia^{-1}	asumida de [1]
N_1^h	Población humanos total en la ciudad	89586 habitantes	individuos	[12]
N_2^h	Población humanos en la mina	$N_1^h / 10$	individuos	asumida
N_1^m	Mosquitos en la ciudad	100000	individuos	asumida
N_2^m	Mosquitos en la mina	200000	individuos	asumida