

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRIA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“Modelado Epidemiológico de Infección por Rickettsiosis de Garrapatas y Perros de
la Ciudad de Mexicali Baja California”**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

Maestro en Ciencias

PRESENTA

Sonia Yaneira Serrato Lugo

DIRECTOR

Dr. Rafael Villa Angulo

Mexicali, B.C.

Enero 2014

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al amor de mi vida, mi esposo, por darme todo su amor, paciencia, comprensión y sobre todo su apoyo incondicional para culminar esta etapa de mi vida, te amo.

A mi hijos, Jaen por su amor que me brinda día a día y que me hace crecer como madre, y sobre todo por su comprensión, a mi pequeño Alexson, por su ternura y que con su llegada lleno de dicha nuestro hogar.

A mis padres por todo su apoyo incondicional que me brindaron a lo largo de mi formación, y aunque mi madre ya no está con nosotros sé que estaría orgullosa de verme crecer como mujer, como madre y como profesionalista, y a mi padre que siempre esta cuando lo necesito con sus consejos, enseñanzas y sobre su sabiduría, gracias por todo lo que me has dado.

Al Dr. Rafael Villa Angulo, director de tesis, por su valiosa guía y asesoramiento a la realización de este proyecto, y sobre todo su amabilidad y comprensión.

Y gracias a todas las personas que me apoyaron directa e indirectamente en todo este tiempo para la realización de este proyecto y así concluir una etapa más de mi vida.

ÍNDICE

I	INTRODUCCION.....	1
1.1	Estadísticas actuales de salud pública en Mexicali.	1
1.2	Las Rickettsiosis	6
1.3	Epidemia de Rickettsia en la ciudad de Mexicali	9
1.4	Modelados epidemiológicos determinísticos	13
1.4.1	Modelo SI	15
1.4.2	Modelo SIS	16
1.4.3	Modelo SIR.....	18
1.4.4	Modelado de enfermedades transmitidas por vector	20
1.4.4.1	Modelo de GAFF	21
1.4.5	Solución de modelos epidemiológicos	27
1.4.5.1	Método de Runge Kutta de 4to orden (RK4)	27
1.5	Planteamiento del problema.....	28
1.6	Objetivos y metas.....	31
II	MODELO DE GAFF PARA SIMULAR LA INFECCION DE GARRAPATAS Y PERROS EN LA CIUDAD DE MEXICALI, BAJA CALIFORNIA	32
2.1	Parametrización.....	32
2.2	Implementación del modelo de Gaff.....	41
III	PRUEBAS Y RESULTADOS	45
3.1	Crecimiento de la población de perros, con respecto al tiempo.....	46
3.2	Crecimiento de la población de garrapatas, con respecto al tiempo.	48
3.3	Crecimiento de la población de perros infectados, con respecto al tiempo.	50
3.4	Crecimiento de la población de garrapatas infectadas, con respecto al tiempo.	52
3.5	Comportamiento de las poblaciones de perros y garrapatas por colonia.	54
3.5.1	Colonia Cuauhtémoc	54
3.5.2	Colonia Independencia.	56
3.5.3	Colonia Pro-hogar.....	58
3.5.4	Colonia Bordowisteria.....	60
3.5.5	Colonia Villafontana.....	62
IV	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	67
4.2	Trabajo futuro.....	68
	BIBLIOGRAFÍA	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Garrapatas.....	7
Figura 2. Erupciones cutáneas por Rickettsia.....	8
Figura 3. Rhipicephalus Sanguineus, vector común de la Rickettsia Rickettsi.....	9
Figura 4. Panorama epidemiológico de Ricktssiosis del sector salud en Mexicali B.C, estadísticas de los años 2009, 2010 y 2011.....	10
Figura 5. Casos por semana Epidemiológica.....	11
Figura 6. Los parámetros utilizados para el modelo SI son $n=1\ 000$ y $\lambda=1$	16
Figura 7. Modelo SIS, los parámetros utilizados son $n=1\ 000$, $\lambda=1$ y $\mu=0.3$	17
Figura 8. Modelo SIR los parámetros utilizados son $n=1\ 000$, $\lambda=1$ y $\mu=0.3$	19
Figura 9. Un servidor implementado un sistema de información geográfica basada en el web administrara la conectividad entre 10 estados a lo largo de la frontera México-USA.	29
Figura 10. Plataforma de simulación. Datos son aplicados a modelos epidemiológicos y redes complejas son usadas para proyectar el área infectada.	30
Figura 11. Censo de población de Mexicali B.C con datos del INEGI.	34
Figura 12. Viviendas y población, por colonia, datos obtenidos del INEGI.	37
Figura 13. Implementación del método de Runge Kutta de 4to orden. Valores resultantes en las variables iterativas.	43
Figura 14. Gráficas de crecimiento del número de perros, N , por m^2 en el tiempo.....	47
Figura 15. Gráficas del número de garrapatas, V , por m^2 en el tiempo.	49
Figura 16. Graficas del número de perros infectados, Y , por m^2 en el tiempo.....	51
Figura 17. Graficas del número de garrapatas infectadas de Ricketssia por m^2 en el tiempo.	53
Figura 18. Comportamiento de las poblaciones de perros y garrapatas, tanto totales como infectadas, en la colonia Cuauhtémoc.....	56
Figura 19. Comportamiento de las poblaciones de perros y garrapatas, tanto totales como infectadas, en la colonia Independencia.....	58
Figura 20. Comportamiento de las poblaciones de perros y garrapatas, tanto totales como infectadas, en la colonia Independencia.....	60
Figura 21. Comportamiento de las poblaciones de perros y garrapatas, tanto totales como infectadas, en la colonia Bordowisteria.	62
Figura 22. Comportamiento de las poblaciones de perros y garrapatas, tanto totales como infectadas, en la colonia Villafontana.	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales causas de mortalidad general en Baja California 2010.	2
Tabla 2. Principales causas de mortalidad en Mexicali en el 2009.	3
Tabla 3. Principales causas de morbilidad en Mexicali en el 2009.	4
Tabla 4. Padecimientos distintivos por jurisdicción de servicios de salud.	5
Tabla 5. Variables y parámetros que utiliza el Modelo de Gaff.	21
Tabla 6. Censo población de Mexicali B.C. del 2000,2005 y 2010.	34
Tabla 7. Estimación de perros con respecto al censo de población.	35
Tabla 8. Estimación de perros por año y su tasa de crecimiento.	35
Tabla 9. Número total de perros en los hogares encuestados por colonia, de acuerdo a las encuestas del Instituto de Investigaciones en Ciencias Veterinarias de la UABC.....	37
Tabla 10. Colonias seleccionadas, con el número de viviendas, personas y su superficie en m ² , con el cálculo de la estimación de perros y el parámetro K ..	38
Tabla 11. Parámetros calculados, para la simulación del modelo	40
Tabla 12. Valores para el parámetro K de cada colonia en el estudio.	41
Tabla 13. Población de perros totales e infectados en tres instantes en el tiempo.....	64
Tabla 14. Población de garrapatas totales e infectadas en tres instantes en el tiempo	65

I INTRODUCCION

1.1 Estadísticas actuales de salud pública en Mexicali.

La necesidad de implementar sistemas de vigilancia y alerta temprana de brotes de patógenos emergentes y reemergentes en el estado de Baja California ha incrementado en los últimos años. Eventos tales como los brotes de Rickettsiosis (enfermedad infecciosa producida por bacterias conocidas como Rickettsias, que destruyen las células de algunos tejidos) y del virus de la influenza AH1N1 (enfermedad respiratoria aguda altamente contagiosa que ocurre en los cerdos y que es causada por uno de los varios virus de Influenza tipo A que circulan en estos animales) han generado numerosos decesos en la población [1]. El diseño de estrategias de prevención y mitigación debe ser parte indispensable de la agenda gubernamental de salud; el cual debe incluir herramientas para el diseño de cercos sanitarios, planes de desalojamiento de áreas escolares e industriales, programas de vacunación oportuna, entre otras.

CAPITULO I

Las principales causas de muerte en el año 2010, documentadas en el Perfil de Baja California, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se presentan en la tabla 1. Se observa que la primera causa de mortalidad son las enfermedades isquémicas del corazón, con 640 casos y una tasa de mortalidad del 19.7.

Tabla 1. Principales causas de mortalidad general en Baja California 2010.

NUMERO	CAUSA	CASOS	TASA
1	Enfermedades isquémicas del corazón	640	19.7
2	Diabetes mellitus	548	16.8
3	Enfermedad cerebrovascular	283	8.7
4	Agresiones (homicidios)	194	6.0
5	Cirrosis y otras enfermedades crónicas del hígado	185	5.7
6	Infecciones respiratorias agudas bajas	180	5.5
7	Enfermedades hipertensivas	146	5.4
8	Enfermedad pulmonar obstructiva crónica	125	3.8
9	Nefritis y Nefrosis	95	2.9
10	VIH/SIDA	91	2.8

Sin embargo, en la estadística específica para el año 2009, de la ciudad de Mexicali, aun cuando las primeras cinco causas se mantienen a la par con la del estado, en sexto lugar de

CAPITULO I

las causas de muerte aparece la influenza y neumonía, con 2013 casos y una tasa de 21.9, como se muestra en la tabla 2 [2].

Tabla 2. Principales causas de mortalidad en Mexicali en el 2009.

NUMERO	CAUSA	CASOS	TASA
1	Enfermedades del corazón	833	85.66
2	Tumores malignos	709	72.91
3	Diabetes mellitus	549	56.46
4	Enfermedades cerebrovasculares	353	36.3
5	Accidentes	224	23.04
6	Influenza y neumonía	213	21.9
7	Enfermedades pulmonares obstructivo crónicas	129	13.27
8	Ciertas afecciones originadas en el periodo perinatal	125	13.06
9	Enfermedades del hígado	125	12.85
10	Agresiones/homicidios	107	11
11	Insuficiencia renal	106	10.9
12	Malformaciones congénitas, deformaciones y anomalías cromosómicas	106	10.9
13	Tuberculosis pulmonar	62	6.38
14	Enfermedades por virus de inmunodeficiencia adquirida (SIDA)	57	5.86
15	Hepatitis viral	46	4.73

CAPITULO I

Aun mas, la morbilidad de las enfermedades más frecuentes para el año 2009, en Mexicali, fueron las infecciones respiratorias agudas, las infecciones intestinales, las infecciones de las vías urinarias, las úlceras, gastritis y duodenitis; como se muestra en la Tabla 3 [2].

Tabla 3. Principales causas de morbilidad en Mexicali en el 2009.

NUMERO	CAUSA	CASOS	TASA
1	Infecciones respiratorias agudas	225736	23214.1
2	Infecciones intestinales por otros organismos	33184	3412.56
3	Infecciones de vías urinarias	23346	2400.84
4	Úlcera, gastritis y duodenitis	8615	885.94
5	Hipertensión arterial	6725	691.58
6	Otitis media aguda	4721	485.5
7	Asma y estado asmático	4504	463.18
8	Diabetes mellitus no insulinodependencia	4087	420.3
9	Varicela	2720	279.72
10	Influenza	2079	213.8
11	Neumonía y bronconeumonías	1868	192.1
12	Quemaduras	1711	175.95
13	Candidiasis urogenital	1496	153.84
14	Amebiasis intestinal	1470	151.17
15	Gingivitis y enfermedades periodontal	1406	144.59

CAPITULO I

Los datos muestran que las principales causas de mortalidad en la ciudad de Mexicali se deben a enfermedades de causa hereditaria, o desarrolladas por infecciosidad permanente, mientras que la morbilidad está más relacionada con enfermedades infecciosas que afectan a las personas con factor de riesgo como la contaminación del aire que provoca infecciones respiratorias agudas, la contaminación del agua que provoca enfermedades diarreicas agudas y la contaminación de alimentos, entre otros [2].

En el estado, debido a la ubicación geográfica y las condiciones ambientales de las distintas jurisdicciones, existen enfermedades distintivas que las caracterizan. La tabla 4 muestra un listado por jurisdicción de los padecimientos estadísticamente más prevalentes. En el caso de Mexicali, podemos observar que los padecimientos más frecuentes son la intoxicación alimentaria, la diarrea, la ameba libre, golpe de calor, el asma y la rickettsiosis, entre otras.

Tabla 4. Padecimientos distintivos por jurisdicción de servicios de salud.

MEXICALI	TIJUANA	ENSENADA	VICENTE GUERREO
Intoxicación alimentaria	SIDA	Displasia cervical	Faringitis y amigdalitis
Diarreas	Accidentes	Virus de Papiloma Humano (VPH)	Heridas de cabeza
Ameba de la vida libre	Malformaciones congénitas	Accidentes de vehículo de motor	Traumatismo del ojo
Golpe de calor	Infecciones de transmisión sexual	Marea roja	Salmonelosis
Asma	Hipotermia	Fiebre tifoidea	Dermatitis

CAPITULO I

Reckettsiosis	Diabetes mellitus	Enfermedades cerebrovasculares	Intoxicación plaguicida
Enfermedades del corazón	Tuberculosis pulmonar y Tuberculosis miliar	Suicidios	X
Tumores malignos	Adicciones	Intoxicación por plaguicida	X
Enfermedades del hígado	Desnutrición	X	X
Virus del Nilo Occidental	Defectos del tubo Neural	X	X

1.2 Las Rickettsiosis

Las Rickettsiosis son enfermedades infecciosas causadas por bacterias del género *Rickettsia*. Estas enfermedades tienen un impacto a nivel mundial, ya que son responsables de numerosos brotes epidemiológicos que se han generado a través del tiempo, afectando amplios sectores de la población causando la muerte. Estas están asociadas a malas condiciones higiénicas [3], normalmente viven en ácaros, garrapatas, pulgas y piojos, y pueden transmitirse a los humanos a través de las mordeduras de estos agentes succionadores de sangre [4]. La figura 1 muestra la imagen de dos garrapatas, que son los agentes más comunes para infectar perros con *Rickettsias*.



Figura 1. Garrapatas.

La rickettsia, son parásitos intracelulares obligados (necesitan un huésped) que se transmiten naturalmente entre los animales y el hombre. Estas son transmitidas desde los huéspedes reservorios al humano a través de la mordedura de una gran variedad de artrópodos, como los piojos, las pulgas y las garrapatas. Cada uno de ellos, están asociados a una o varias enfermedades rickettsiales y son fundamentales para mantener ciclos zoonóticos dentro de la naturaleza. Los seres humanos son huéspedes fortuitos y no contribuyen a la propagación de la bacteria [3].

Una infección por rickettsias, puede causar fiebre, erupción cutánea y una sensación de malestar. Debido a que esta erupción característica, no suele aparecer durante varios días, es difícil establecer un diagnóstico, y dados que sus síntomas no son específicos de la enfermedad, suelen confundirse con otras enfermedades comunes, provocando la demora de un tratamiento adecuado [5]. La figura 2 muestra dos ejemplos de erupciones cutáneas producidas por la infección de Rickettsias.



Figura 2. Erupciones cutáneas por Rickettsia.

Pero al ser detectada rápidamente, el tratamiento responde con el antibiótico cloranfenicol, o bien tetraciclinas, que se administran por vía oral. Los pacientes que estén demasiado enfermos como para tomar los antibióticos por vía oral, pueden recibirlos de forma intravenosa [5].

El responsable de la transmisión de la enfermedad se denomina vector. Una enfermedad transmitida por vector es aquella en la que un organismo patógeno, responsable de la enfermedad, no se puede transmitir directamente entre humanos. Los vectores pueden ser mamíferos, pájaros, artrópodos e insectos. Las enfermedades para las cuales una garrapata es la encargada de la transmisión de la enfermedad, como La Fiebre Manchada de las Montañas Rocosas (causada por la *Rickettsia Rickettsi*) constituyen uno de los problemas más grandes y de mayor impacto en la salud pública a nivel mundial [6]. La figura 3 muestra una garrapata *Rhipicephalus Sanguineus*, que es un vector común de la *Rickettsia Rickettsi*.



Figura 3. *Rhipicephalus Sanguineus*, vector común de la *Rickettsia Rickettsi*.

1.3 Epidemia de *Rickettsia* en la ciudad de Mexicali

En Mexicali, desde el año 2009 las rickettsiosis son importantes debido a los brotes que han generado, causando muertes [4], las principales *Rickettsias* que se han detectado son: La Fiebre Manchada de las Montañas Rocosas (*R. rickettsii*), Tifus Epidémico (*R. prowazekii*) y Tifus endémico (*R. typhi*) [4]. La Fiebre Manchada de las Montañas Rocosas causada por *R. Rickettsi*, es una enfermedad transmitida por las garrapatas que tiene potencial epidemiológico, en Mexicali la Principal especie que fue detectada es la garrapata café del perro (*Rhipicephalus sanguineus*) [2]. La figura 4 muestra un panorama de la Rickettsiosis en la ciudad de Mexicali, incluyendo estadísticas de los años 2009, 2010 y 2011.

2009							
Casos	Vivos	Defunciones	Total	Resultado	Vivos	Defunciones	Total
Sospechosos	1,467	15	1,482	R. rickettsi	281	9	290
Probables	740	12	752	R. prowaseky	3	0	3
Confirmados	284	9	293	Confirmados	284	9	293

2010							
Casos	Vivos	Defunciones	Total	Resultado	Vivos	Defunciones	Total
Sospechosos	391	15	406	R. rickettsi	79	6	85
Probables	80	15	95	R. prowaseky	12	0	12
Confirmados	132	12	144	R. Tiphy	26	1	27
				Erliquia	6	0	6
				Rickettsia sp	23	5	28

2011							
Casos	Vivos	Defunciones	Total	Resultado	Vivos	Defunciones	Total
Sospechosos	430	10	440	R. rickettsi	89	5	94
Probables	314	8	322	R. prowaseky	14	2	16
Confirmados	127	8	135	R. Tiphy	30	1	31
				Erliquia	9	0	9

Figura 4. Panorama epidemiológico de Ricktssiosis del sector salud en Mexicali B.C, estadísticas de los años 2009, 2010 y 2011[4].

En la figura 4 se observa que aun cuando el número total de confirmados disminuyo de forma consecutiva en los tres años, el número es alto, con más de 130 casos confirmados por año. Los casos sospechosos son las personas con fiebre, cefalea y un mal estado general, mientras que los casos probables aparte de estas condiciones contaban con una o más de las siguientes, exantema, trombocitopenia, leucocitosis, neutrofilia, elevación

CAPITULO I

de transaminasas, dolor abdominal, nausea o vómito, signos neurológicos, manifestaciones hemorrágicas o antecedentes de mordeduras por garrapata, piojo o pulgas. Y los casos confirmados son los que el laboratorio da como positivo [4]. La figura 5 muestra una gráfica de los casos por semana epidemiológica.

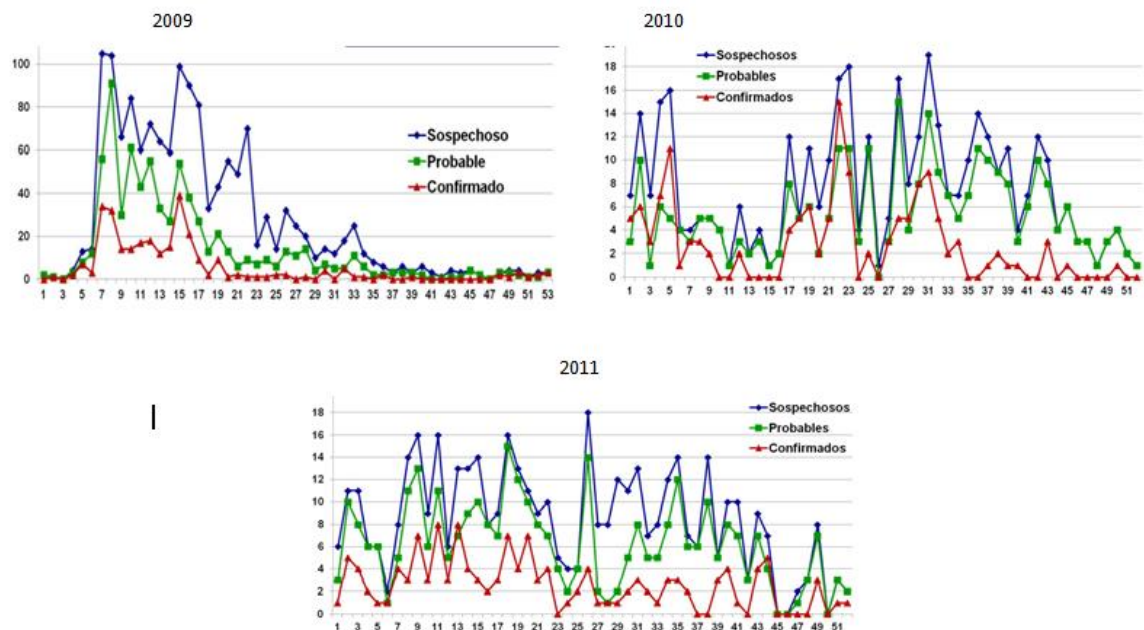


Figura 5. Casos por semana Epidemiológica.

La ecología de los vectores artrópodos es el factor determinante en la prevalencia de las enfermedades por Rickettsias debido a que varias especies son vectores específicos para agentes rickettsiales que causan las enfermedades en los seres humanos y animales. La incidencia de la Rickettsiosis ha venido aumentando en los últimos años y se considera que las causas del aumento parecen estar relacionadas con aumento de los vectores y el mayor acercamiento del hombre a los mismos [5].

En la ciudad de Mexicali, la incidencia de la Fiebre Manchada de las Montañas Rocosas tiene variabilidad estacional, y va de la mano con la actividad de sus vectores, las garrapatas, las cuales mantienen un ciclo, dado que el patógeno es mantenido en la naturaleza, a través de varias generaciones mediante el paso transtadial (a través de los diferentes estados de desarrollo) y del paso transovarico (la hembra infecta a su descendencia). Algunas garrapatas *Rhipicephalus* requieren dos o tres huéspedes para completar su ciclo, y su mordedura no es dolorosa [8].

El cuadro clínico es muy variable. El periodo de incubación generalmente tarda de 1 a 14 días. Cuanto más grave sea el caso, mucho más corto es el periodo de incubación. Los signos comunes de infección incluyen fiebre, dolor de cabeza, náusea, vómito y anorexia. Sin embargo estos hallazgos son difíciles de diferenciar de algunos que se presentan en las infecciones virales [9]. La enfermedad clínica inicia con la mordedura de una garrapata infectada y es caracterizada por fiebre, erupción y posibles complicaciones incluyendo encefalitis y desordenes respiratorios. El exantema característico, se inicia en muñecas y tobillo, se extiende a todo el cuerpo y tiende a desaparecer a medida que baja la fiebre, pero que puede dejar manchas pigmentadas durante semanas. En cuadros más avanzados suele presentarse pulso débil, hipertensión y sordera transitoria. Y tiene un periodo de convalecencia prolongada. En perros comúnmente se presenta poliartritis. El diagnóstico es difícil dado que no se presentan manifestaciones específicas para la enfermedad. El tratamiento debe iniciarse rápidamente con tetraciclinas o Cloranfenicol dado que el agente es sensible a éstos y permiten la reacción inmune del organismo. El tratamiento con antibióticos puede alterar

el curso de la enfermedad rickettsial y resultar en presentaciones inusuales [5]. Los síntomas se resuelven rápidamente cuando se inicia un tratamiento temprano y la mortalidad se reduce significativamente.

1.4 Modelados epidemiológicos determinísticos

Hoy en día los modelos matemáticos son una herramienta utilizada para los problemas en medicina, biología, bioquímica, epidemiología, entre otras áreas del conocimiento; sus objetivos primordiales son describir, explicar y predecir fenómenos y procesos en dichas áreas. Pero su aplicación se ve limitada por la falta de conocimiento e información acerca de los principios básicos del modelamiento matemático [10].

Un modelo está definido por las relaciones que incorpora. Estas relaciones son independientes de los datos a introducir en el modelo, ya que un modelo puede usarse para diferentes ocasiones y en distintos contextos. Los modelos matemáticos para enfermedades infecciosas se utilizan como herramienta para tomar decisiones y deben valorarse en justa medida, ya que difícilmente es comprensible un problema complejo sin una mínima modelación, y hay que reconocer que no es posible modelar la totalidad de las situaciones reales. La función central de crear y analizar modelos matemáticos es mejorar la comprensión de un sistema para prevenir futuras situaciones de enfermedades, determinar la prevalencia e incidencia y coadyuvar a tomar decisiones objetivas para controlar o erradicar las enfermedades [10].

Existen dos tipos de modelos matemáticos: determinísticos y estocásticos. En el modelo determinístico se pueden controlar los factores que intervienen en el estudio del

proceso o fenómeno y por ello se pueden predecir con exactitud sus resultados. En un modelo estocástico no es posible controlar los factores que intervienen en el estudio del fenómeno y en consecuencia no produce simples resultados únicos [10] Los modelos matemáticos se pueden utilizar para ayudar a explicar los datos empíricos u ofrecer predicciones de lo que podría ocurrir bajo ciertas condiciones. El uso de un modelo puede ayudar a identificar los mecanismos dentro de un sistema y destacar las áreas donde se necesita más investigación.

La epidemiología se define como el estudio de los procesos naturales que involucran la transición de la enfermedad con la salud desde el punto de vista de poblaciones. Un modelo epidemiológico intenta describir los fenómenos asociados a la propagación de una enfermedad, buscando realizar predicciones que sean útiles en la evaluación de programas de control y a su vez, intentar hacer sugerencias para buscar el camino que conduzca al mejoramiento de las herramientas de prevención.

El primer acercamiento entre el modelado matemático y los fenómenos epidemiológicos lo realizó Ronald Ross en 1911 quien introdujo el concepto de compartimentos y acción de masa en tiempo continuo. Su trabajo influyó al científico Anderson Gray MacKendrick quien desarrolló los primeros modelos epidemiológicos para enfermedades tropicales, entre las cuales se encontraba la malaria [11]. En 1927 MacKendrick y de W. O. Kermack desarrollaron el primer modelo, basado en ecuaciones diferenciales, capaz de describir el rápido aumento y la posterior disminución en el número de pacientes infectados en una epidemia, este fenómeno se observó en epidemias como la de hepatitis en Somalia (1986) y la de cólera en Londres (1865) [12].

1.4.1 Modelo SI

El modelo SI es el más simple, donde la población solamente consiste en susceptibles (S) e infectados (I), y si se enferma un individuo, la enfermedad es permanente (no hay recuperación). Se supone que la población es cerrada, es decir; se tiene que el número de susceptibles más el número de infectados es el total de la población, en todo momento,

$$S(t) + I(t) = N,$$

Y consistente en un sistema de dos ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dS}{dt} = -\lambda I(t)S(t) / N$$

$$\frac{dI}{dt} = \lambda I(t)S(t) / N$$

Donde aparecen dos variables dependientes: $S(t)$ que es el número de los susceptibles y $I(t)$ que es el número de los infecciosos en el instante t (tiempo determinado). Y λ es la tasa (contactos por unidad de tiempo). El flujo de transiciones de un grupo a otro se da como sigue:

$$S \longrightarrow I$$

Este modelo es homogéneo para las personas, ya que se presupone que cada individuo tiene el mismo número esperado de contactos, de tal manera que es posible decir que el modelo presupone una interacción aleatoria. En la solución a este modelo, el

número de individuos infectados que puede transmitir la infección es bajo en las primeras etapas del proceso, mientras que el número de individuos susceptibles es bajo en las últimas etapas. Como resultado, el número de infectados experimenta el mayor crecimiento durante la etapa intermedia del proceso.

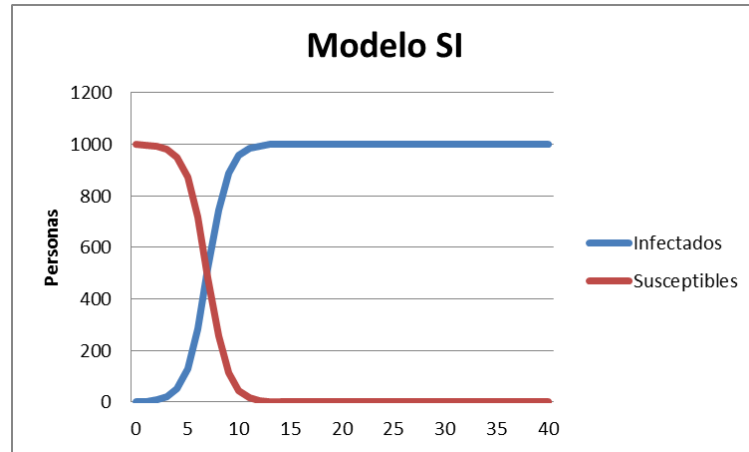


Figura 6. Los parámetros utilizados para el modelo SI son $n=1\ 000$ y $\lambda=1$

1.4.2 Modelo SIS

Para el modelo SIS consideremos ahora el efecto de recuperación, pero donde la recuperación no resulta en inmunidad, es decir un individuo recuperado puede nuevamente enfermarse. Veremos que tal modelo puede modelar una enfermedad que permanece en la población como enfermedad endémica.

El modelo SIS puede formularse como un sistema de dos ecuaciones diferenciales,

$$\frac{dS}{dt} = -\lambda I(t)S(t)/N + \mu I(t)$$

$$\frac{dI}{dt} = \lambda I(t)S(t)/N - \mu I(t)$$

CAPITULO I

Donde aparecen dos variables dependientes: $S(t)$ es el número de los susceptibles y $I(t)$ es el número de los infecciosos en el instante t (tiempo determinado), λ es la tasa (contactos por unidad de tiempo), y se le agrega el termino $\mu I(t)$ en la ecuación, que nos describe el ritmo al que los individuos se recuperan de la enfermedad o se convierten en susceptibles de nuevo, por lo que se debe de aplica en ambas ecuaciones.

El modelo SIS puede ser representado por el siguiente esquema:

$$S \rightarrow I \rightarrow S.$$

La trayectoria SIS difiere de la SI en que el número de personas infectadas al mismo tiempo nunca alcanza el total de la población (lo que no excluye la posibilidad de que cada uno de los individuos pueda infectarse en algún otro momento). Por el contrario, el proceso alcanza un equilibrio cuando exactamente el mismo número de individuos infecciosos se convierte en susceptible o viceversa.

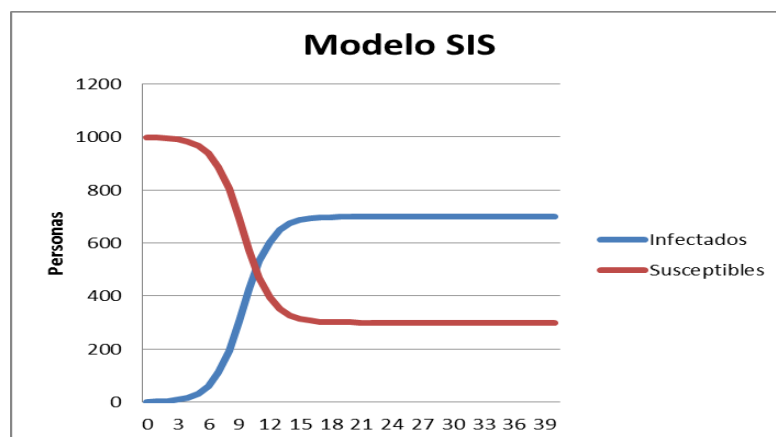


Figura 7. Modelo SIS, los parámetros utilizados son $n=1\ 000$, $\lambda=1$ y $\mu=0.3$.

1.4.3 Modelo SIR

El modelo SIR epidémico es una extensión de los modelos SI y SIS con la novedad esencial de que ahora los individuos que salen de la clase I de los infectados, no pueden ser infectados nuevamente, sino que terminan en la clase R de los recuperados, es decir para el propósito del modelamiento estos individuos se consideran inmunes, muertos o aislados.

En lo siguiente se supone que el tiempo de incubación de la enfermedad, y que la duración de la epidemia comparada con la esperanza de vida de los huéspedes son iguales, así que no se tomaran en cuenta los nacimientos y fallecimientos.

Entonces se considera una población cerrada, es decir $S(t) + I(t) + R(t) = N$, donde $S(t)$, $I(t)$ y $R(t)$ son los números de los individuos susceptibles, infectados y recuperados, respectivamente, en el instante t .

Las ecuaciones diferenciales correspondientes son las siguientes:

$$\frac{dS}{dt} = -\lambda I(t)S(t) / N$$

$$\frac{dI}{dt} = \lambda I(t)S(t) / N - \mu I(t)$$

$$\frac{dR}{dt} = \mu I(t)$$

Donde las variables del modelo son:

t = tiempo en días, con $t=0$ en el momento que se detectó,

S = número de individuos susceptibles,

CAPITULO I

I = número de individuos infectados,

R = número de individuos recuperados.

En este modelo la variable independiente es el tiempo, t , y el resto son variables dependientes del tiempo; $S(t)$, $I(t)$ y $R(t)$. Estas son funciones que no pueden ser expresadas por formulas explicitas.

El modelo SIR es utilizado en epidemiologia para calcular la cantidad de personas Susceptibles, Infectadas y Recuperadas durante un brote.

$$S \longrightarrow I \longrightarrow R$$

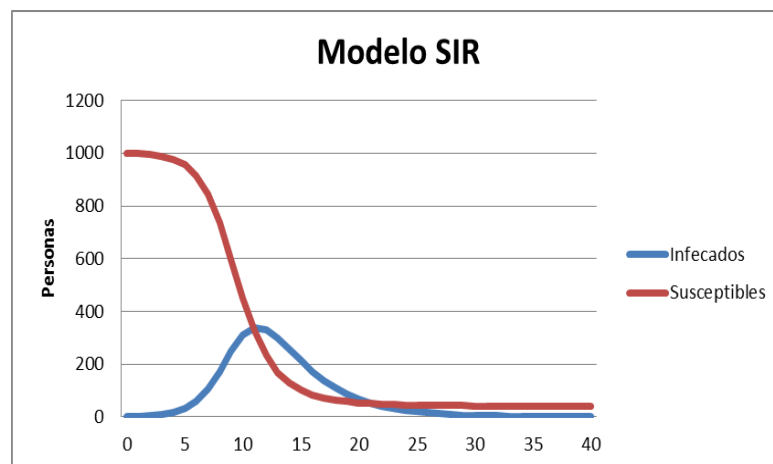


Figura 8. Modelo SIR los parámetros utilizados son $n=1\ 000$, $\lambda=1$ y $\mu=0.3$

El modelo SIR es adecuado cuando se hacen las siguientes asunciones:

- El tamaño de la población es fijo,

- La única forma de que una persona deje al grupo de susceptibles es que pase a ser infectado,
- La única forma que una persona deje el grupo de infectados es que se recupere de la enfermedad,
- Una vez que la persona se recupera, obtiene inmunidad a la enfermedad,
- La edad, sexo, estatus social y raza no afectan la probabilidad de ser infectado,
- No existe la inmunidad heredada,
- Los miembros de la población se mezclan de forma homogénea, esto es; tienen el mismo grado de interacción con todos.

1.4.4 Modelado de enfermedades transmitidas por vector

Las garrapatas son uno de los vectores más importantes de enfermedades zoonóticas en todo el mundo que llevan infecciones graves que pueden agotar las poblaciones de ganado y la vida silvestre, así como los seres humanos que infectan. En consecuencia se han desarrollado modelos matemáticos de enfermedades transmitidas por garrapatas considerando la dinámica particular de la garrapata como vector. Dentro de los modelos epidemiológicos SIR transmitidos por vectores hay dos modelos distintos, un SIS para los anfitriones y un SI para la vectores. Los anfitriones comienzan como susceptible y pasar a la categoría infectado una vez que adquieren la enfermedad, sin embargo, cuando un huésped se recupera de la enfermedad, se convertirán inmediatamente susceptible a la enfermedad de nuevo. Mientras que el vector susceptible se infecta, este ya no puede recuperarse, ya queda infectado y no puede cambiar de ese estado.

Los recientes aumentos en los brotes de enfermedades transmitidas por las garrapatas han conducido a un mayor interés en la comprensión y el control de epidemias relacionadas con estos vectores de transmisión. Modelos de enfermedades matemáticos suelen asumir tamaño de la población constante. Para enfermedades transmitidas por garrapatas, estos supuestos no siempre son válidos. El modelo de la enfermedad que aquí se presenta incorpora población de tamaños no constantes que utiliza un sistema de ecuaciones diferenciales. Donde luego numéricamente se explora la dinámica de la enfermedad cuando esta permite que los parámetros varíen espacialmente y temporalmente y considera la eficacia de diversas estrategias de control de garrapatas

1.4.4.1 Modelo de GAFF

La Ehrlichiosis es causada por bacterias que pertenecen a la familia llamada Rickettsiae, las cuales ocasionan enfermedades graves en todo el mundo, tales como La Fiebre Manchada de las Montañas Rocosas y el Tifus. Todas estas enfermedades se propagan a los humanos por la mordedura de garrapatas, pulgas y ácaros [14].

Se considera un modelo de la dinámica de una infección transmitida por garrapatas en el caso de un único huésped, un solo patógeno, y una etapa de la vida de soltero.

Tabla 5. Variables y parámetros que utiliza el Modelo de Gaff.

NAME	DESCRIPCION	VALOR
β	Tasa de crecimiento del huésped	0.2
$\hat{\beta}$	Tasa de crecimiento de la garrapata	0.75

CAPITULO I

K	Capacidad de carga del huésped por m ²	0.002 (bosque), 0.001 (hierva)
M	Máximo número de garrapatas por huésped	200
B	Tasa externa de mortalidad del huésped	0.01
$\hat{b}$	Tasa externa de mortalidad de la garrapata	0.01 (bosque), 0.1 (hierva)
A	Tasa de transmisión del huésped a la garrapata	0.2
$\hat{A}$	Tasa de transmisión de la garrapata al huésped	0.07
V	Tasa de recuperación del huésped	0

El modelo es apropiado para la garrapata estrella solitaria, porque esta garrapata tiene el mismo huésped preferido, el venado cola blanca, para todas las etapas de la vida, lo que reduce la necesidad de modelar múltiples etapas de la vida. En el modelo de la enfermedad transmitida por garrapatas, tenemos densidad de población para huésped (N) y garrapatas (V), así como la densidad de individuos en cada población que están infectados con la enfermedad Y y X , respectivamente, para los huéspedes y garrapatas [13].

Descripción del Modelo de Gaff:

$$\frac{dN}{dt} = \beta \left(\frac{K - N}{K} \right) N - bN$$

$$\frac{dV}{dt} = \hat{\beta} V \left(\frac{MN - V}{MN} \right) - \hat{b}V$$

$$\frac{dY}{dt} = A \left(\frac{N - Y}{N} \right) X - \beta \frac{NY}{K} - (b + v)Y$$

$$\frac{dY}{dt} = \hat{A}\left(\frac{Y}{N}\right)(V - X) - \hat{\beta} \frac{VX}{MN} - \hat{b}X$$

El modelo se utiliza para describir la interacción de las garrapatas estrella solitaria y sus anfitriones, el venado cola blanca, ya que sus poblaciones se infectan con el *E.chaffeensi* que causa la Ehrlichiosis monocítica humana (EMH). Tanto para los ciervos y las poblaciones de garrapatas, no asumimos ninguna estructura dentro de la población, excepto para el estado de la infección. Se supone que el patógeno de la enfermedad pasa de una garrapata infectada a un huésped susceptible o de un huésped infectado a una garrapata susceptible durante una comida de sangre. El modelo no permite que las garrapatas se recuperen de la enfermedad, pero los huéspedes se recuperen a un ritmo determinado (ν) sin inmunidad duradera [13]. La ecuación 1 expresa la tasa de cambio poblacional el huésped.

$$\frac{dN}{dt} = \beta\left(\frac{K - N}{K}\right)N - bN \quad (1)$$

La ecuación describe la dinámica poblacional de los ciervos, lo que refleja el crecimiento de logística con la capacidad de carga (K) y una tasa de mortalidad externa (b) que se derivan de la caza o la eliminación de la zona [13].

$$\frac{dV}{dt} = \hat{\beta}V\left(\frac{MN - V}{MN}\right) - \hat{b}V \quad (2)$$

La población de garrapatas se describe en la ecuación 2. Como las garrapatas dependen de sus anfitriones para una comida de sangre, la población de garrapatas está limitada por un número máximo de las garrapatas por huésped (M). La población de garrapatas también tiene una tasa de mortalidad externa $[\beta]$.

$$\frac{dY}{dt} = A \left(\frac{N-Y}{N} \right) X - \beta \frac{NY}{K} - (b + \nu)Y \quad (3)$$

$$\frac{dY}{dt} = A \left(\frac{Y}{N} \right) (V - X) - \beta \frac{VX}{MN} - \hat{b}X \quad (4)$$

El modelo de la enfermedad se rige por las ecuaciones 3 y 4. El primer término de las ecuaciones representa la transmisión de enfermedades. El segundo término, el del lado derecho de las ecuaciones, representa reducciones de huéspedes y vectores infectados como resultado de las interacciones competitivas dentro de cada especie [13].

No hay consenso en la literatura para cualquiera de los parámetros de este modelo, por lo que los parámetros se estiman por los valores de las regiones geográficas similares a la zona de Condado de Cumberland. Todas las cantidades y los resultados son por mes y por m² [13].

El parámetro K , densidad de población de ciervos pueden variar desde 7.5 hasta 40.0 por km², de acuerdo con el tipo de habitat. Para este modelo, se supone 20 ciervos por km², y por lo tanto, utilizamos la estimación del parámetro $K = 0.002$ ciervos por m² de una zona boscosa [15,16].

El parámetro M, número máximo de garrapatas por ciervos varía según la fase de la vida de la garrapata, pero la densidad media se estima en algún lugar entre 50 [17] y 400 [18] garrapatas por ciervo. Valor aproximado, $M = 200$ garrapatas por ciervo.

El parámetro $(\hat{\beta})$. Hay muchos factores que tienen impacto en el valor de $\hat{\beta}$, la tasa de natalidad del vector (garrapatas). La reproducción anual de las garrapatas depende de la temperatura, con un máximo de 5000 huevos a 23 ° C, con un promedio más cerca de 1000 huevos por hembra. Aproximadamente el 70% de estos huevos sobreviven [16], y suponemos que la mitad de la población es de sexo femenino.

La probabilidad de una garrapata de encontrar un anfitrión se estima en 0.03 por semana [18]. Las tasas de supervivencia fuera del huésped promedio entre 0.7 y 0.95 dependiendo del tipo de hábitat [18], y aquí usamos 0.85. La tasa de nacimiento $\hat{\beta}$ se estima que es el producto de todos estos factores, es decir:

$$\hat{\beta} = 0.5 * \frac{1000}{12} * 0.7 * 0.03 * 0.85 = 0.75$$

En el parámetro $\hat{b}$ se estima que la tasa de mortalidad es diez veces mayor en la hierba que en las zonas boscosas porque la humedad baja y temperaturas más altas de las zonas verdes reducen la supervivencia de garrapata [16]. Por lo tanto, sin las medidas de control, se estima que en una zona boscosa $\hat{b} = 0.01$, mientras que en una zona de césped $\hat{b} = 0.1$.

El parámetro b es la tasa de mortalidad externa de los ciervos, y se le permite ser distinto de cero bajo el supuesto de que el área permite la caza. Esta tasa de mortalidad es estacional y depende de la velocidad de la caza permitida en la zona.

El parámetro β es la tasa de crecimiento para los anfitriones. Se establece en un valor arbitrario de 0.2. Suponemos que los ciervos no se recuperan de la rickettsia, es decir, $\nu = 0$.

Los parámetros A y $\hat{A}$. Estos son quizá los más difíciles de estimar con precisión, corresponden a las velocidades de transmisión A y $\hat{A}$. La probabilidad de infección a partir de un encuentro de garrapatas y ciervos no se ha estimado de forma explícita [19]. Las tasas de transmisión se estima como $A = 0.02$ y $\hat{A} = 0.02$ [20].

Es importante tomar en cuenta que todos los parámetros del modelo deben ser no negativos para tener sentido biológico. De la ecuación 1, para la población de acogida para sobrevivir se requiere $\beta > b$, y de la ecuación 2, para la población de garrapatas, para sobrevivir se requiere $\hat{\beta} > \hat{b}$. La ecuación 5 representa la tasa reproductiva básica R_0 .

$$R_0 = A\hat{A} \frac{V^*}{N^*} \frac{1}{\beta} \frac{1}{\beta + \nu} > 1 \quad (4)$$

Esto ahora puede ser visto como un producto de las tasas de infección, A y $\hat{A}$, la relación de equilibrio de las garrapatas a huéspedes, V^*/N^* , la duración media de la supervivencia de la garrapata, $\frac{1}{\beta}$ y la duración media de la supervivencia para el huésped combinada con la tasa de recuperación, $\frac{1}{\beta + \nu}$ [13].

1.4.5 Solución de modelos epidemiológicos

Una ecuación diferencial no necesariamente tiene solución, y aun si la tuviera, no siempre podemos expresarla en forma explícita o implícita; en muchos de los casos tendremos que utilizar un método de aproximación. Cuando existe solución a una ecuación diferencial, esta representa un conjunto de puntos en el plano cartesiano. Pero cuando no se tiene, se emplean procedimientos de ecuaciones diferenciales para obtener una sucesión de puntos distintos cuyas coordenadas se aproximen a las coordenadas de los puntos de la curva real de solución. Algunos de los métodos de aproximación más utilizados son el Método de Euler y el Método de Runge Kutta. Para este trabajo se utilizó este último por ser uno de los más exactos.

1.4.5.1 Método de Runge Kutta de 4to orden (RK4)

Uno de los procedimientos numéricos más conocidos y más exactos para obtener soluciones aproximadas para un problema de valor inicial de distintos órdenes es el método de Runge-Kutta [21]. Los métodos de Runge-Kutta son un conjunto de métodos implícitos y explícitos para solucionar las ecuaciones diferenciales ordinarias por medio de la aproximación, concretamente, del problema de valor inicial [21]. Las funciones de aproximación de Modelo de Runge-Kutta de 4to orden son:

$$y_{n+1}=y_n+\frac{h}{6}(m_1+2m_2+2m_3+m_4)$$

$$u_{n+1}=u_n+\frac{h}{6}(k_1+2k_2+2k_3+k_4)$$

dónde:

$$\begin{aligned} m_1 &= u_n & k_1 &= f(x_n, y_n, u_n) \\ m_2 &= u_n + \frac{1}{2} h k_1 & k_2 &= f\left(x_n + \frac{1}{2} h, y_n + \frac{1}{2} h m_1, u_n + \frac{1}{2} h k_1\right) \\ m_3 &= u_n + \frac{1}{2} h k_2 & k_3 &= f\left(x_n + \frac{1}{2} h, y_n + \frac{1}{2} h m_2, u_n + \frac{1}{2} h k_2\right) \\ m_4 &= u_n + h k_3 & k_4 &= f(x_n + h, y_n + h m_3, u_n + h k_3) \end{aligned}$$

Con este método se resolvió el modelo Gaff que se presentara en siguiente capítulo.

1.5 Planteamiento del problema

La experiencia con el brote de Rickettsia en la ciudad de Mexicali, el año 2009, aunado al del virus de la influenza AH1N1 y al terremoto sucedido el 4 de abril del 2010, pusieron en evidencia la vulnerabilidad de nuestro sistema de salud. Patógenos emergentes y reemergentes son en la actualidad una amenaza latente no solo en Mexicali, sino en todo el estado, y ambos lados de la frontera México-USA. La preocupación de los distintos sectores por mantener activa la vigilancia temprana contra posibles contingencias ha generado iniciativas binacionales para vigilancia y prevención conjunta; tal es el caso del consorcio Una Frontera Una Salud (OBOH, “One Border One Health”, por sus sigla en Inglés) el cual es una iniciativa binacional multisectorial para construir comunidades fronterizas más saludables, construyendo soluciones a riesgos de salud en la interface animal-humano-medio ambiente a lo largo de la frontera entre México y USA [28]. La coalición consiste de más 50 instituciones, ~30 de Estados Unidos y ~20 de México, de los sectores militar, gubernamental, público, privado y académicos. Esta fue creada el año

2011 y consiste de tres comités: Vigilancia, Informática y Entrenamiento y educación, los cuales están cooperando para diseñar e implementar el primer prototipo operacional para vigilancia y respuesta utilizando el paradigma de Una Salud [29]. Por su parte el comité de informática está desarrollando un sistema colaborativo multisectorial para simular la dispersión de patógenos en ambos lados de la frontera México-USA [30]. El sistema está siendo diseñado para albergar un conjunto de de bases de datos relacionales multisectoriales distribuidas a los largo de ambos lados de la frontera. Estas bases de datos pertenecen a los miembros del OBOH. Un sistema de información geográfica basado en el web (WGISS) será el responsable de administrar la conectividad para el acceso de información compartida por las bases de datos. La figura 9 muestra el esquema general de conectividad del sistema en desarrollo.

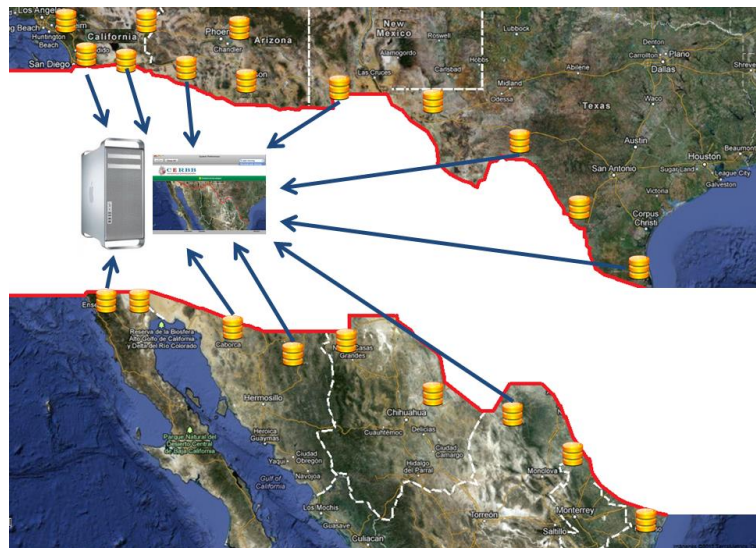


Figura 9. Un servidor implementado un sistema de información geográfica basada en el web administrara la conectividad entre 10 estados e lo largo de la frontera México-USA.

La entrada a la plataforma de simulación incluye información sobre variables de medio ambiente, ecología, biología y socioeconómicas, y es validada con información de eventos históricos de la región. La figura 10 muestra un esquema de la plataforma de simulación.

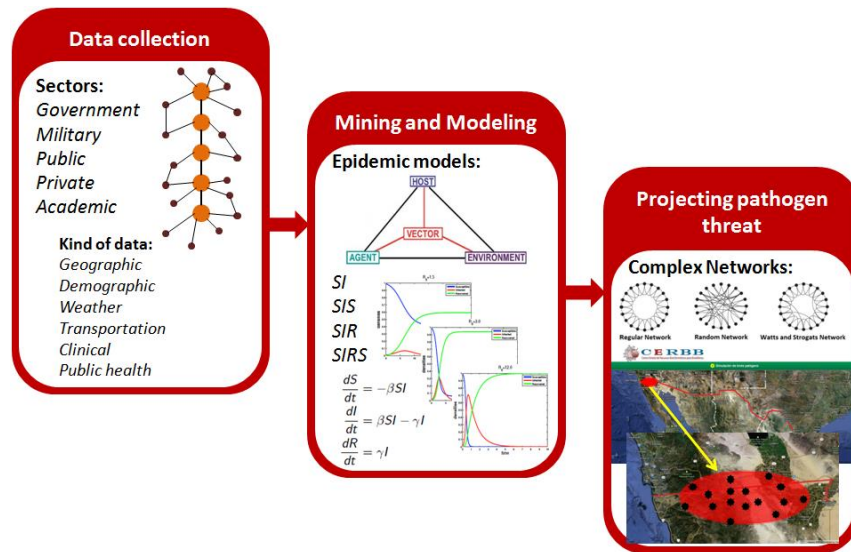


Figura 10. Plataforma de simulación. Datos son aplicados a modelos epidemiológicos y redes complejas son usadas para proyectar el área infectada.

En su estado actual, el sistema ejecuta simulaciones del estado de Baja California, y en especial de la ciudad de Mexicali. La primera meta es implementar modelos epidemiológicos para simular y proyectar eventos de riesgo en la ciudad, tales como brotes de Rickttsiosis, de influenza AH1N1 y de brotes de Dengue, entre otros. De esto que es necesario implementar dichos modelos con datos reales de la región. Este trabajo de tesis pretende resolver esta necesidad de una forma sistemática y modular, para ser incluida en el sistema que se encuentra en desarrollo.

1.6 Objetivos y metas.

De la necesidad de implementar modelos epidemiológicos para emular la dispersión de patógenos emergentes y reemergentes en la región, tomando en cuenta datos de los eventos históricos, el objetivo de este trabajo es diseñar e implementar un modelo de simulación de la infección de Ricktsiosis de garrapatas y perros en la ciudad de Mexicali, Baja California.

Las metas específicas del trabajo son:

1. Recopilar información sobre el panorama de salud en la ciudad de Mexicali, Baja California,
2. Estudiar los modelos epidemiológicos para Ricktsiosis,
3. Seleccionar e implementar un modelo para simular la infección por Ricktsia de garrapatas y perros en la ciudad de Mexicali, Baja California.

II MODELO DE GAFF PARA SIMULAR LA INFECCION DE GARRAPATAS Y PERROS EN LA CIUDAD DE MEXICALI, BAJA CALIFORNIA

2.1 Parametrización

Para realizar la simulación de la infección de garrapatas y perros en la ciudad de Mexicali se utilizó el Modelo de Graff descrito en el apartado 1.4.4.1. Los valores de algunos parámetros fueron adoptados del trabajo original de Gaff, mientras que otros fueron calculados con información de la ciudad de Mexicali. A continuación se describe la forma en que los parámetros fueron adaptados y calculados.

Los parámetros que fueron adoptados con los mismos valores del trabajo original de Gaff son los siguientes:

- La tasa de crecimiento de las garrapatas, $\hat{\beta}$, y la tasa de mortalidad de las garrapatas, $\hat{b}$. Estos dos parámetros no se modificaron, pero en el caso de la tasa

de mortalidad se seleccionó su valor de bosque, en vez del valor de la hierba, debido a que los cambios climáticos en la ciudad de Mexicali se asemejan más a los del bosque debido a los valores extremos en distintas estaciones del año.

- Número máximo de garrapatas por huésped, M , de igual manera no se modificó, dejando el mismo valor promedio de 200 garrapatas por huésped.
- La tasa de recuperación, v , dado que tanto el vector como el huésped no se recuperan de la *Rickettsia*.
- La tasa de transmisión del huésped a la garrapata A , y la tasa de transmisión de la garrapata a huésped $\hat{A}$.
- Las poblaciones iniciales infectadas del vector y del huésped, Y y X , respectivamente.

Como se observa en las asignaciones anteriores, los parámetros relacionados con el vector no fueron modificados, debido a la falta de información veraz y experimental de la ciudad de Mexicali.

Los parámetros que fueron calculados con la información de la ciudad de Mexicali se describen a continuación:

- La población inicial de perros en la ciudad de Mexicali, N . Para realizar esta estimación se utilizó la relación de 4.3 personas por perro, estimado para zonas rurales en México [31]. El cálculo se realizó estratificado por colonia en la ciudad de Mexicali, tomando la población humana reportada por INEGI.

CAPITULO II

La tabla 6, y la figura 11 muestran la población de la ciudad de Mexicali, de acuerdo con INEGI [22,23,24].

Tabla 6. Censo población de Mexicali B.C. del 2000,2005 y 2010.

CENSO	AÑO 2000	AÑO 2005	AÑO 2010
Población total	764,602	855,962	936,826

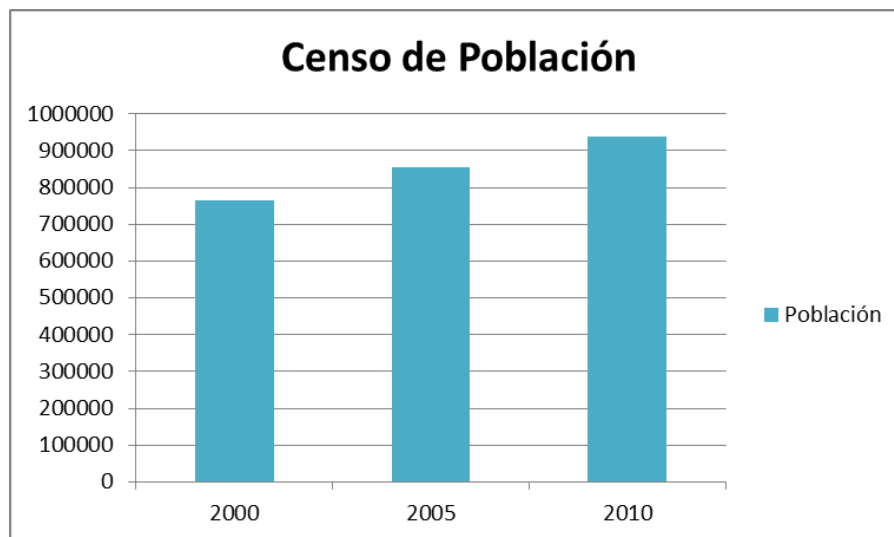


Figura 11. Censo de población de Mexicali B.C con datos del INEGI.

Con la recopilación de esta información se calculó los parámetros que se utilizaron para la realización de la simulación. Una vez teniendo el censo de población se calculó la estimación de los perros, utilizando la relación 4.3. La tabla 7 muestra las cantidades obtenidas.

CAPITULO II

Tabla 7. Estimación de perros con respecto al censo de población.

CENSO	POBLACION	ESTIMACION DE PERROS
2000	764602	177814
2005	855962	199061
2010	936826	217867

Esta estimación de perros se calculó de la siguiente forma:

$764602 * 1 / 4.3 = 177814$, Cantidad de población *un perro, sobre 4.3 personas.

Una vez que se obtuvo la estimación de perros respecto al censo de población de cada 5 años, se calculó la cantidad de perros por año, asumiendo un comportamiento lineal, y se obtuvo la tabla 8.

Tabla 8. Estimación de perros por año y su tasa de crecimiento.

AÑO	ESTIMACION DE PERROS	ESTIMACION POR AÑO	TASA DE CRECIMIENTO DEL NUMERO DE PERROS (%)
2011	221872	4005	1.8383777

Para calcular el número de perros por año se tomó la estimación de perros del 2010 y se le restó la estimación de perros del 2000, dividiendo el resultado entre 10, que son los años transcurridos:

Estimación de perros por año = $(217867 - 177814) / 10 = 4005$

CAPITULO II

Para realizar una estimación de los perros para el año 2011, se sumó el número estimado de perros por año a la cantidad del 2010, obteniendo:

$$\text{Estimación de perros en el 2011} = 217867 + 4005 = 221872$$

Para estimar la tasa de crecimiento del número de perros por año, se tomó el número de perros estimados para el 2011, menos la estimación de perros del 2010, entre la estimación de perros del 2010; todo esto multiplicado por 100.

$$\text{Tasa de crecimiento} = \frac{(\text{poblacion al final del periodo} - \text{poblacion al principio del periodo})}{\text{poblacion al principio del periodo}}$$

$$((221872 - 217867) / 217867) * 100 = 1.8383777 = B$$

Este valor fue utilizado, en el modelo de Gaff, como parámetro B , tasa de crecimiento del huésped.

- Capacidad de carga del huésped por metro cuadrado, K . Para obtener este parámetro se realizó lo siguiente: se tomó información de un estudio realizado en la ciudad de Mexicali B.C por el Instituto de Investigaciones en Ciencias Veterinarias de la UABC [estudio realizado por el Dr. Luis Tinoco], en el cual se muestrearon perros de distintas colonias de la ciudad de Mexicali. Del estudio previo, se eligió las cinco colonias con más cantidad de perros muestreados, y la estimación del parámetro K , se realizó para cada una de estas colonias de forma separada. Las colonias y la cantidad de perros muestreados se presentan en la tabla 9.

CAPITULO II

Tabla 9. Número total de perros en los hogares encuestados por colonia, de acuerdo a las encuestas del Instituto de Investigaciones en Ciencias Veterinarias de la UABC.

COLONIA	NUMERO DE PERROS EN EL HOGAR
Cuauhtémoc	62
Independencia	23
Pro-hogar	95
Villafontana	116
Wisteria	41

Teniendo las 5 colonias con más número de perros en el hogar, se obtuvo el número de viviendas y de personas que habitan en esas colonias. Estos datos se obtuvieron del INEGI, lo cual al no contar con un número total por colonia, se realizó el conteo de acuerdo al límite de la colonia, vivienda por vivienda así como cuantos habitantes hay en ella, como se muestra en la figura 12.



Figura 12. Viviendas y población, por colonia, datos obtenidos del INEGI.

CAPITULO II

La superficie en m^2 de cada colonia se obtuvo de la página de INEGI, la cual permite obtener delimitar espacios y estimar su superficie [27]. Con esta información y con la estimación del número de perros, se obtuvo el parámetro K , que es la capacidad de carga del huésped por m^2 . La tabla 10 muestra los resultados.

Tabla 10. Colonias seleccionadas, con el número de viviendas, personas y su superficie en m^2 , con el cálculo de la estimación de perros y el parámetro K .

COLONIA	VIVIENDAS	PERSONAS	PERROS	SUPERFICIE (m^2)	K
Cuauhtémoc	2422	6291	1463	1577000	0.00092773
Independencia	5642	16183	3763	2862000	0.00131499
Pro-hogar	3319	8867	2062	1676000	0.00123037
Villafontana	1427	4050	942	1293000	0.00072843
Wisteria	292	799	186	179547.941	0.0010349

El parámetro K se calculó dividiendo la superficie en m^2 sobre la estimación de perros de cada colonia.

- Por último, la tasa de mortalidad del huésped, b . Debido a que no se tiene un valor estimado de la ciudad de Mexicali, para este parámetro, se calculó de forma indirecta asumiendo que la razón entre la tasa de crecimiento del número de huéspedes, B , sobre la tasa de mortalidad del huésped, b , tiene el mismo valor en la ciudad de Mexicali, comparado con las condiciones del trabajo original de Gaff. Obteniendo esta razón con los valores originales, es posible igualar la razón de la ciudad de Mexicali, en la cual el valor b , sería el valor por despejar y obtener. El cálculo se realizó de la siguiente forma:

La razón tomando los valores originales del trabajo de Gaff es la siguiente:

$$\frac{\beta}{b} = \frac{0.2}{0.01} = 20$$

En el caso de la ciudad de Mexicali, el valor previamente calculado es $B = 0.01838$, presentado en la tabla 13. De esto que la razón de ambas tasa para la ciudad de Mexicali se expresaría de la siguiente forma:

$$\frac{\beta}{b} = \frac{0.01838}{b} = 20$$

Al despejar b de la expresión anterior obtenemos el siguiente valor para la tasa de mortalidad del huésped:

$$b = \frac{0.01838}{20} = 0.00091$$

Las tablas 11 y 12 muestran el conjunto completo de los valores de los parámetros del modelo de Gaff con su valor original y con los valores estimados para la ciudad de Mexicali. Notemos que el valor de la carga del huésped por metro cuadrado, K , aparece en blanco para la ciudad de Mexicali, en la tabla 11, debido a que es presentado para cada colonia en el estudios, en la tabla 12.

CAPITULO II

Tabla 11. Parámetros calculados, para la simulación del modelo

PARAMETRO	DESCRIPCION	VALOR GAFF	VALOR MEXICALI
β	Tasa de crecimiento del número de huéspedes	0.2	0.018
$\hat{\beta}$	Tasa de crecimiento de garrapatas	0.75	0.75
K	Capacidad de carga del huésped por m ²	0.001	
M	Número máximo de garrapatas por huésped	200	200
B	Tasa de mortalidad del huésped	0.01	0.0009
$\hat{b}$	Tasa de mortalidad de garrapatas (bosque, primavera y otoño)	0.01	0.01
A	Velocidad de transmisión de garrapatas a huésped	0.02	0.02
$\hat{A}$	Velocidad de transmisión de huésped a garrapatas	0.07	0.07
V	Tasa de recuperación de huésped	0	0
N	Población inicial de huéspedes	0.001	0.001
V	Población inicial de garrapatas	0.3	0.3
Y	Población inicial de	0.00001	0.00001

huéspedes infectado			
X	Población inicial de garrapatas infectadas	0.0001	0.0001

Tabla 12. Valores para el parámetro K de cada colonia en el estudio.

COLONIA	K
Cuauhtémoc	0.000927726
Independencia	0.001314985
Pro-hogar	0.001230366
Villafontana	0.00072843
Bordo Wisteria	0.001034899

2.2 Implementación del modelo de Gaff

Una vez obtenidos los valores de los parámetros para la simulación, el modelo de Gaff fue resuelto utilizando el Método de Runge Kutta de 4to orden. Se implementaron las ecuaciones diferenciales de cada una de las tasas de cambio poblacional tanto del vector (garrapata) con del huésped (perro). La Figura 13 muestra algunos valores resultante de las iteraciones del método de Runge Kutta.

Como ejemplo, en una iteración para la fórmula de la tasa de cambio para la población del huésped:

$$\frac{dN}{dt} = \beta \left(\frac{K - N}{K} \right) N - bN$$

CAPITULO II

Para la variable m1, se resuelve su función de la siguiente forma:

$$m1 = 0.018 \left(\frac{0.00131499 - 0.001}{0.00131499} \right) 0.001 - (0.0009 * 0.001) = 3.41168E - 06$$

De la misma forma es resulta cada una de las variables m2, m3 y m4. Y, su correspondiente variables k1, k2, k3 y k4 para la ecuación de la tasa de cambio poblacional del vector.

J2		f_k = ((SC3*((SC5-F2)/(SC5)*F2)-(SC8*F2))															
	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	
1	valor	t(n)	(N)s(host)	(V)s (garrapatas)	(V)(host)	(X)(garrapatas)	m1	m2	m3	m4	k1	k2	k3	k4	w1		
2	1	0	0.001	0.3	0.00001	0.0001	3.41168E-06	3.39411E-06	3.3942E-06	3.37664E-06	-0.1155	-0.04042922	-0.08601098	-0.01278463	1.83412E-06		
3	0.018	1	0.001003394	0.236472495	1.25931E-05	0.000167451	3.37664E-06	3.3591E-06	3.35919E-06	3.34166E-06	-0.03998169	-0.01730843	-0.02506135	-0.01003647	3.12268E-06		
4	0.75	2	0.001006753	0.21501013	1.62526E-05	0.000224678	3.34166E-06	3.32414E-06	3.32423E-06	3.30673E-06	-0.013089688	-0.00734096	-0.00970259	-0.00456233	4.18243E-06		
5	0.00131499	3	0.001010077	0.206386941	2.10241E-05	0.000291237	3.30673E-06	3.28925E-06	3.28934E-06	3.27187E-06	-0.005413397	-0.00304395	-0.0039626	-0.0018377	5.3939E-06		
6		4	0.001013367	0.202842906	2.71423E-05	0.000374965	3.27187E-06	3.25442E-06	3.25452E-06	3.23709E-06	-0.002155697	-0.00109667	-0.0014966	-0.00054442	6.89752E-06		
7	200	5	0.001016621	0.20152846	3.49502E-05	0.000481954	3.23709E-06	3.21969E-06	3.21978E-06	3.2024E-06	-0.000680335	-0.00018941	-0.00037301	6.8927E-05	8.78988E-06		
8	0.0009	6	0.001019841	0.201239083	4.48823E-05	0.000618689	3.2024E-06	3.18504E-06	3.18513E-06	3.16779E-06	7.06006E-06	0.00023789	0.00015144	0.00035924	1.11623E-05		
9	0.01	7	0.001023026	0.201429908	5.74656E-05	0.000792772	3.16779E-06	3.15048E-06	3.15058E-06	3.1333E-06	0.000330224	0.00043877	0.00039758	0.00049517	1.41084E-05		
10		8	0.001026177	0.201846257	7.33204E-05	0.001013206	3.1333E-06	3.11604E-06	3.11614E-06	3.09891E-06	0.000481365	0.00053169	0.00051195	0.00055704	1.77203E-05		
11	0.02	9	0.001029293	0.202367204	9.31538E-05	0.001290474	3.09891E-06	3.08171E-06	3.0818E-06	3.06464E-06	0.000550422	0.00057286	0.00056338	0.00058331	2.20773E-05		
12	0.07	10	0.001032374	0.202934905	0.000117738	0.001636385	3.06464E-06	3.0475E-06	3.04759E-06	3.03049E-06	0.000580124	0.00058917	0.00058461	0.00059245	2.72255E-05		
13	0	11	0.001035422	0.203521594	0.000147862	0.002063609	3.03049E-06	3.01342E-06	3.01351E-06	2.99647E-06	0.00059092	0.00059353	0.00059133	0.00059337	3.31496E-05		
14	0.001	12	0.001038435	0.20411393	0.000184257	0.002584787	2.99647E-06	2.97947E-06	2.97957E-06	2.9626E-06	0.000592631	0.00059215	0.00059109	0.00059034	3.97381E-05		
15	0.3	13	0.001041415	0.204705506	0.000227476	0.003211115	2.9626E-06	2.94567E-06	2.94576E-06	2.92887E-06	0.000589983	0.00058802	0.00058751	0.00058543	4.67468E-05		
16	0.00001	14	0.001044361	0.205293251	0.000277754	0.003950379	2.92887E-06	2.91201E-06	2.91211E-06	2.89529E-06	0.000585249	0.00058258	0.00058234	0.00057961	5.37744E-05		
17	0.0001	15	0.001047273	0.205875699	0.000334842	0.0048046	2.89529E-06	2.87851E-06	2.87861E-06	2.86187E-06	0.000579527	0.00057652	0.00057641	0.00057339	6.02673E-05		
18		16	0.001050151	0.206452163	0.000397885	0.005767673	2.86187E-06	2.84517E-06	2.84527E-06	2.82861E-06	0.000573344	0.00057019	0.00057014	0.00056698	6.55704E-05		
19		17	0.001052997	0.207022325	0.00046536	0.006823666	2.82861E-06	2.812E-06	2.81209E-06	2.79552E-06	0.000566956	0.00056374	0.00056371	0.0005605	6.90341E-05		
20		18	0.001055809	0.207586051	0.00053516	0.007946537	2.79552E-06	2.779E-06	2.7791E-06	2.76261E-06	0.000560487	0.00055724	0.00055724	0.00055401	7.01572E-05		
21	(1)	19	0.001058588	0.208143294	0.000604809	0.009101848	2.76261E-06	2.74618E-06	2.74627E-06	2.72988E-06	0.000553996	0.00055075	0.00055075	0.00054752	6.87246E-05		
22	(2)	20	0.001061334	0.208694048	0.000671792	0.010250493	2.72988E-06	2.71354E-06	2.71364E-06	2.69734E-06	0.000547513	0.00054428	0.00054428	0.00054106	6.48805E-05		
23	(3)	21	0.001064048	0.209238329	0.000733914	0.011353716	2.69734E-06	2.68109E-06	2.68119E-06	2.66499E-06	0.000541053	0.00053783	0.00053784	0.00053463	5.91026E-05		
24		22	0.001066729	0.209776165	0.000789574	0.012378156	2.66499E-06	2.64883E-06	2.64893E-06	2.63283E-06	0.000534623	0.00053142	0.00053142	0.00052823	5.20814E-05		
25	(4)	23	0.001069378	0.210307588	0.000837903	0.013299596	2.63283E-06	2.61679E-06	2.61688E-06	2.60087E-06	0.000528228	0.00052504	0.00052505	0.00052187	4.45567E-05		
		resumen	colonias	Variables	Independencia	Villarfontana	Pro-hogar	Bordowisteria	Cuahutemoc	Hojal							

Figura 13. Implementación del método de Runge Kutta de 4to orden. Valores resultantes en las variables iterativas.

CAPITULO II

Ya calculada cada una de las variables se pueden resolver las funciones de aproximación de cada una de las tasas de cambio de nuestro modelo:

$$y_{n+1}=y_n+\frac{h}{6}(m_1+2m_2+2m_3+m_4)$$

En la figura 13 se observa el resultado de la tasa de cambio poblacional del huésped, N , la tasa de cambio poblacional del vector, V , la tasa de cambio poblacional del huésped infectado es Y , y la tasa de cambio poblacional del vector infectado, X . Estos cálculos se realizaron para cada una de las colonias de este estudio.

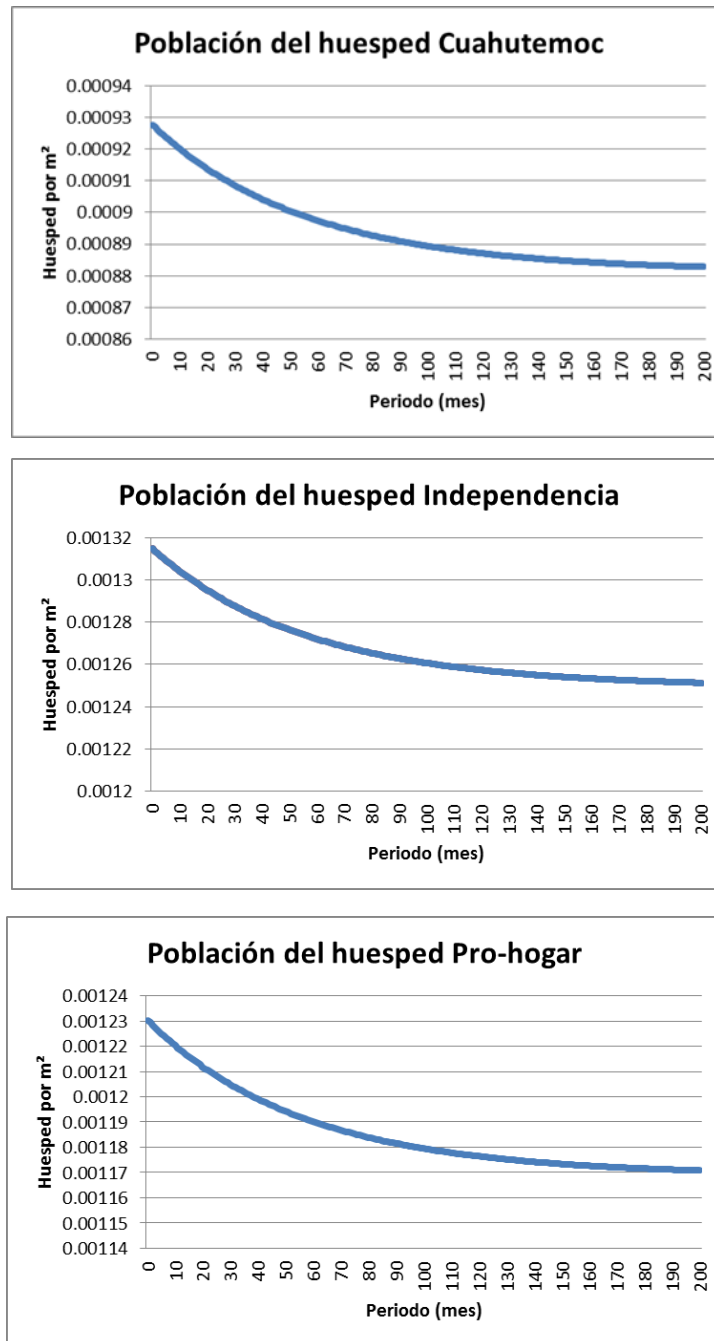
III PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan las pruebas, y se analizan los resultados de la simulación de la infección por *Rickettsia* de garrapatas y perros, utilizando el modelo de Gaff, realizadas para cinco colonias de la ciudad de Mexicali, Baja California. Para cada colonia se utilizó su capacidad de carga del huésped específica, K , y para resolver el modelo se usó el métodos de Runge Kutta de 4to. orden.

Para cada simulación se obtuvo el crecimiento de la cantidad de huéspedes (perros) por metro cuadrado con respecto al tiempo, el crecimiento en la cantidad de garrapatas por metro cuadrado, la cantidad de perros infectados con respecto al tiempo, y la cantidad de garrapatas infectadas con respecto al tiempo. El modelo no considera huéspedes ni garrapatas recuperadas de la infección, por lo que una vez infectadas permanecen en ese estado de por vida. A continuación se presentan las gráficas de resultados:

3.1 Crecimiento de la población de perros, con respecto al tiempo.

La figura 14 muestra las gráficas resultantes del comportamiento de la cantidad de perros en cada colonia, con respecto a tiempo.



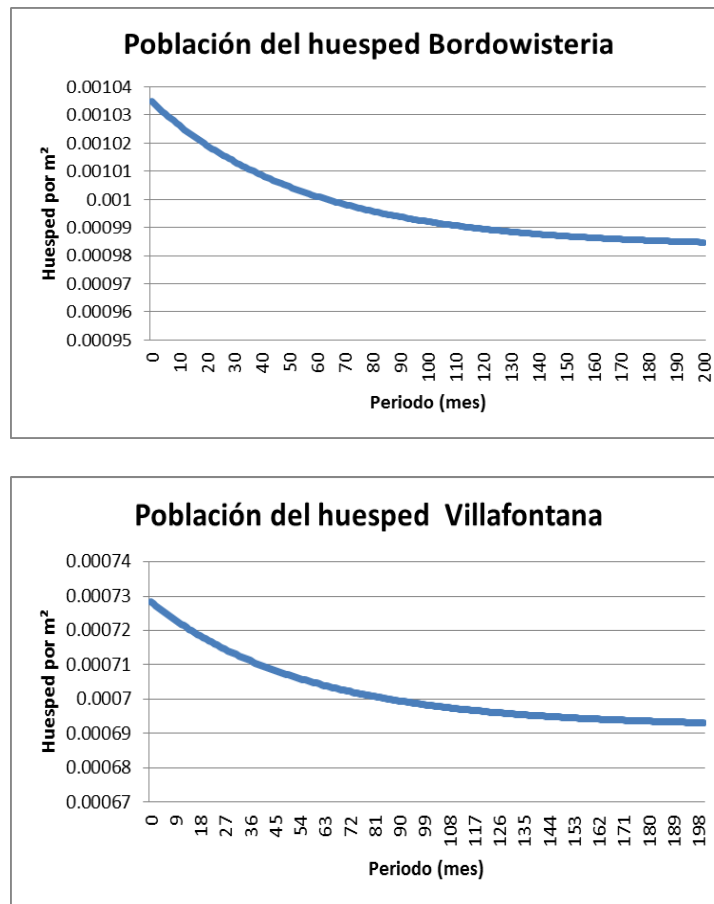


Figura 14. Gráficas de crecimiento del número de perros, N , por m^2 en el tiempo.

Como se observa en la figura 14, las cinco colonias presentan una tendencia monótonamente decreciente en el número de perros por metro cuadrado, con respecto a tiempo.

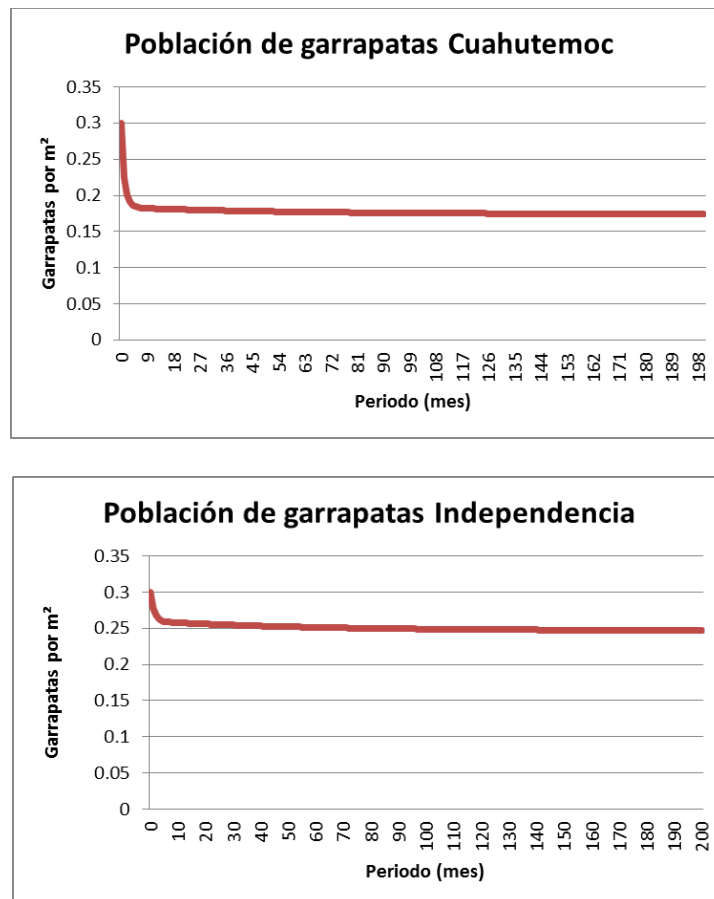
Como lo indica el modelo de Gaff (ecuación 1), el valor de la tasa de cambio del número de perros por m^2 depende de la población actual, de la tasa de crecimiento, de la tasa de mortalidad y de la capacidad de carga por m^2 . Ahora, los dos parámetros que varían de una colonia a otra son la capacidad de carga por m^2 y el tamaño de la

CAPITULO III

población, por lo que, para estas cinco colonias en particular, un tamaño inicial de la población de perros mayor a 2062, y una capacidad de carga mayor a 0.0012 provocó un decremento en la población, como se muestra en las gráficas de las colonias

3.2 Crecimiento de la población de garrapatas, con respecto al tiempo.

La figura 15 muestra las gráficas resultantes del comportamiento de la cantidad de garrapatas en cada colonia, con respecto a tiempo.



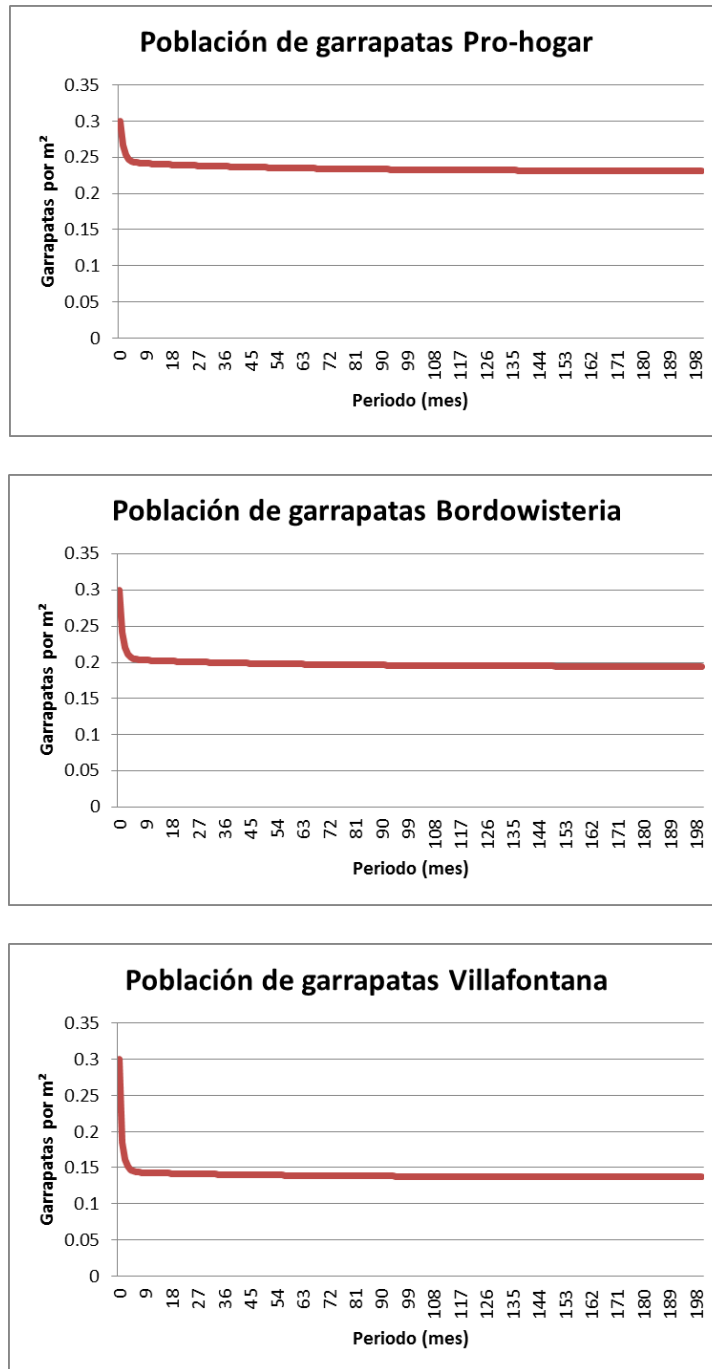
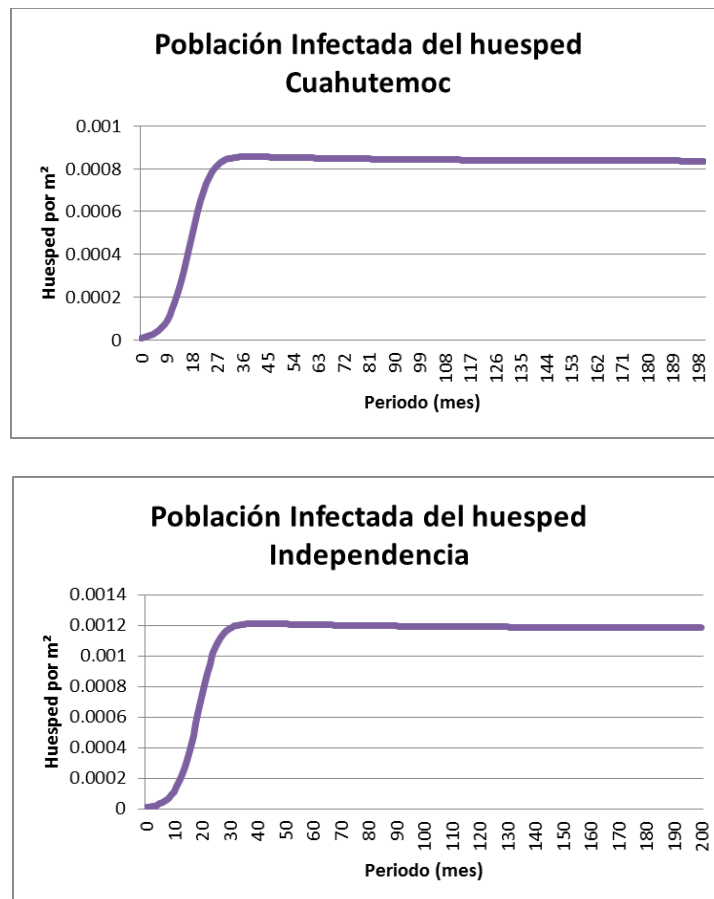


Figura 15. Gráficas del número de garrapatas, V , por m² en el tiempo.

Como puede observarse en la figura 15, las colonias presentan el mismo comportamiento, una disminución drástica en los primeros ~10 meses, y después el número de garrapatas sigue disminuyendo de una forma monótona, a través del tiempo.

3.3 Crecimiento de la población de perros infectados, con respecto al tiempo.

La figura 16 muestra las gráficas resultantes del crecimiento del número de perros infectados con *Rickettsia* en cada colonia, con respecto a tiempo.



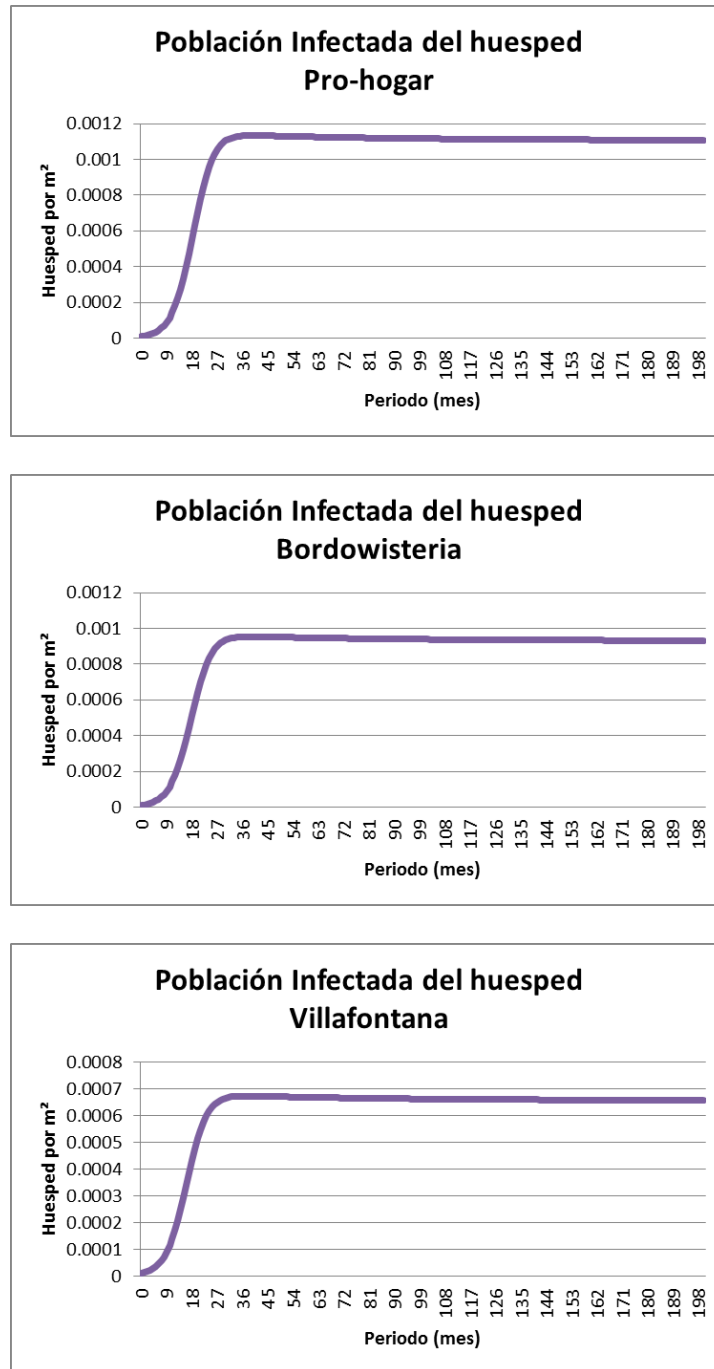
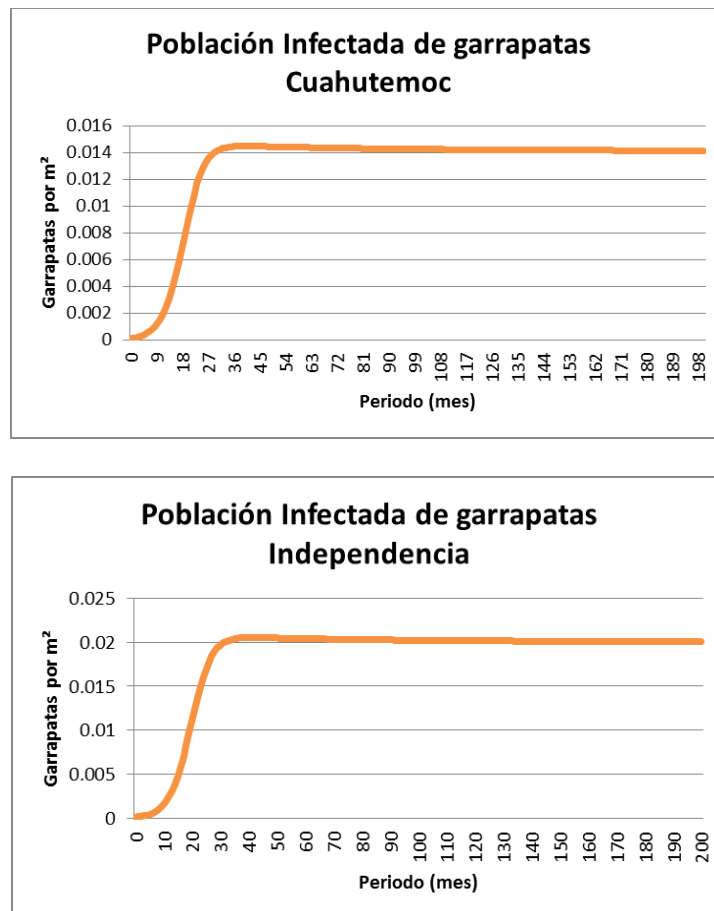


Figura 16. Graficas del número de perros infectados, Y, por m² en el tiempo.

En la figura 16 se observa que en las colonias, el número de perros infectados tiene un aumento drástico que va desde 0 hasta ~ 0.001 perros por m^2 en los primeros ~ 35 meses, y después empieza a decrecer de una forma monótonamente lenta, sin caer por debajo de los 0.0006 perros infectados por m^2 .

3.4 Crecimiento de la población de garrapatas infectadas, con respecto al tiempo.

La figura 17 muestra las gráficas resultantes del crecimiento del número de garrapatas infectadas con *Rickettsia* en cada colonia, con respecto a tiempo.



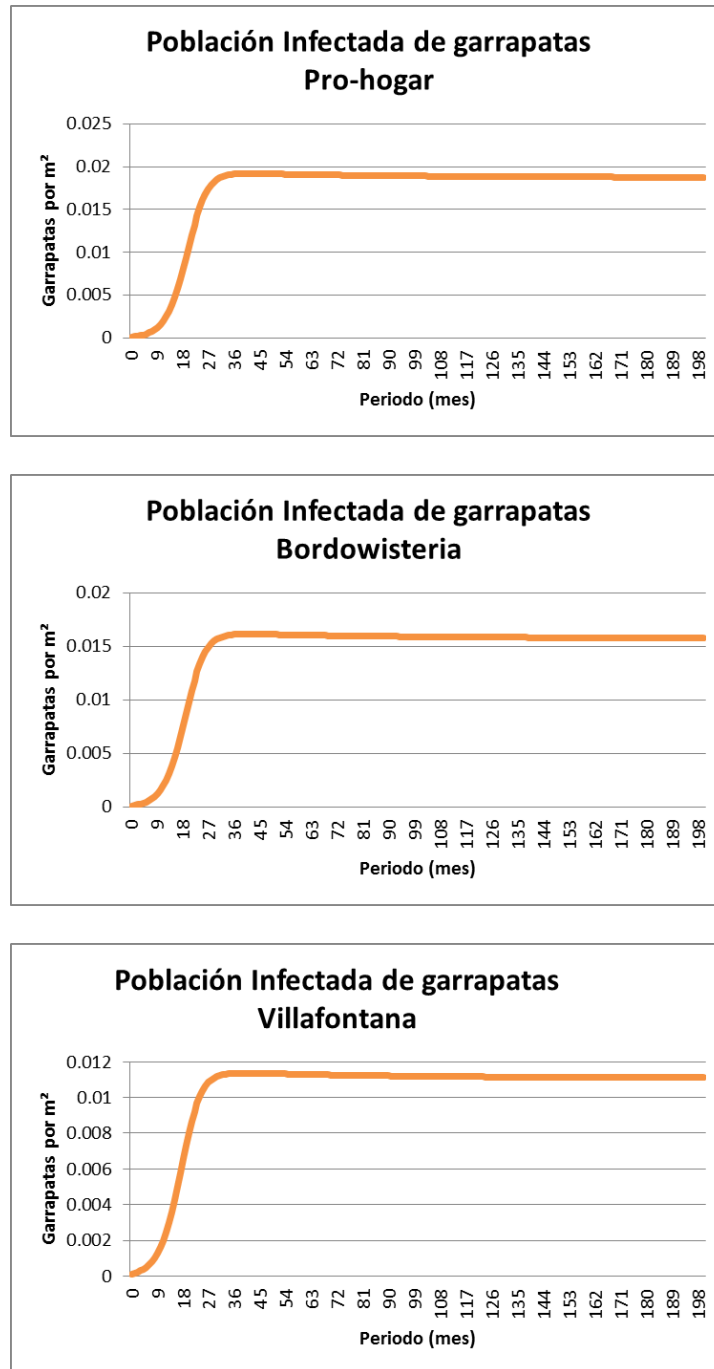


Figura 17. Graficas del número de garrapatas infectadas de Ricketssia por m² en el tiempo.

En la figura 17 podemos observar que el patrón de comportamiento del número de garrapatas infectadas con *Rickettsia* es muy parecido al comportamiento del número de perros infectado, solo que con proporciones distintas. Para las cinco colonias el número de infecciones aumenta de una forma drástica en los primeros ~35 meses. Esta va de 0 garrapatas infectadas por m^2 a ~0.02. Posterior al pico alcanzado en los primeros ~35 meses, en las cinco colonias presentan una decrecimiento monotonico con una disminución de ~0.012 infecciones por m^2 .

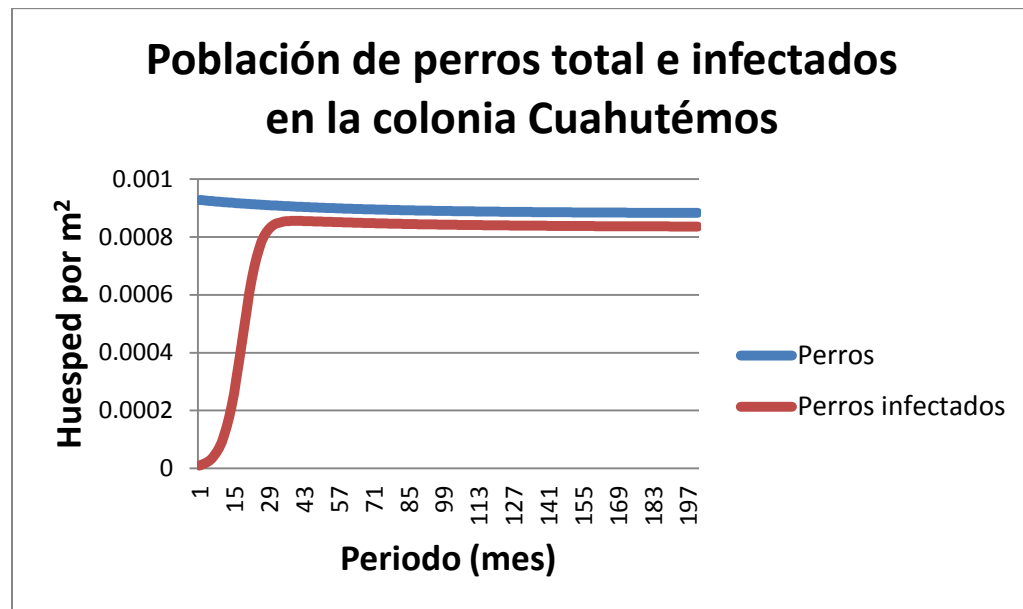
3.5 Comportamiento de las poblaciones de perros y garrapatas por colonia.

En las siguientes secciones se presentan los resultados del comportamiento de las poblaciones de perros y garrapatas, en población total y en infectados.

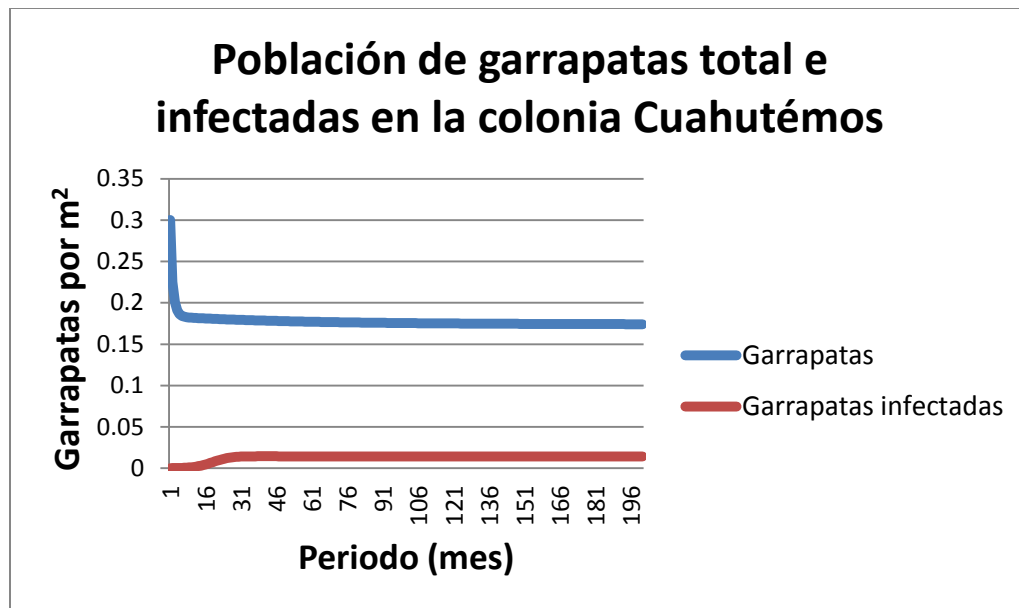
3.5.1 Colonia Cuauhtémoc

La figura 18 muestra el comportamiento de las poblaciones de perros y garrapatas, tanto totales como infectadas, por mes. En la figura 18(a) observamos como el total de perros en la colonia Cuauhtémoc parte de una población inicial de ~0.0009 perros por m^2 , y disminuye con respecto al tiempo de una forma suave y monotónicamente decreciente, con valores que no pasan por debajo de los 0.0008 perros por m^2 , en los primeros 200 meses, que equivale al comportamiento en 16.6 años; mientras que el total de perros infectados crece en los primeros ~35 meses hasta casi alcanzar el total de perros en la colonia. Esto nos indica que el modelo predice que prácticamente todos los perros serian infectados por *Rickettsia* en los primeros ~35 meses del brote de infección.

La figura 18(b) muestra como la población total de garrapatas inicia con una cantidad de ~ 0.3 garrapatas por m^2 y disminuye de una forma drástica hasta ~ 0.17 por m^2 en los primeros ~ 10 meses, posteriormente sigue decreciendo de una forma suave monótonamente sin revezar las 0.15 garrapatas por m^2 ; mientras que las infectadas suben hasta ~ 0.0144 garrapatas por m^2 , y después decrece de una forma monotónicamente suave y lenta.



(a)



(b)

Figura 18. Comportamiento de las poblaciones de perros y garrapatas, tanto totales como infectadas, en la colonia Cuauhtémoc.

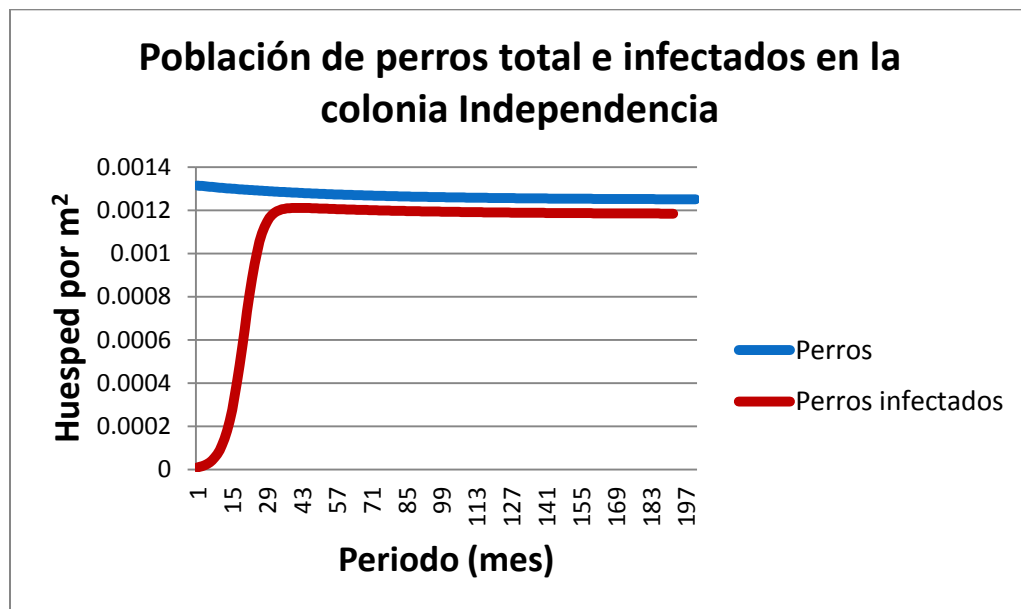
3.5.2 Colonia Independencia.

La figura 19 muestra el comportamiento de las poblaciones de perros y garrapatas, tanto totales como infectadas, por mes. En la figura 19(a) observamos como el total de perros en la colonia Independencia parte de una población inicial de ~ 0.0013 perros por m^2 y disminuye con respecto al tiempo de una forma suave y monotónicamente decreciente, con valores que no pasan por abajo de los 0.0012 perros por m^2 en los primeros 200 meses, que equivale al comportamiento en 16.6 años; mientras que el total de perros infectados crece en los primeros ~ 35 meses hasta casi alcanzar el total de perros en la colonia, y después disminuye con respecto al tiempo de una forma suave y monotónicamente decreciente,. Esto nos indica, al igual que la colonia anterior, que el

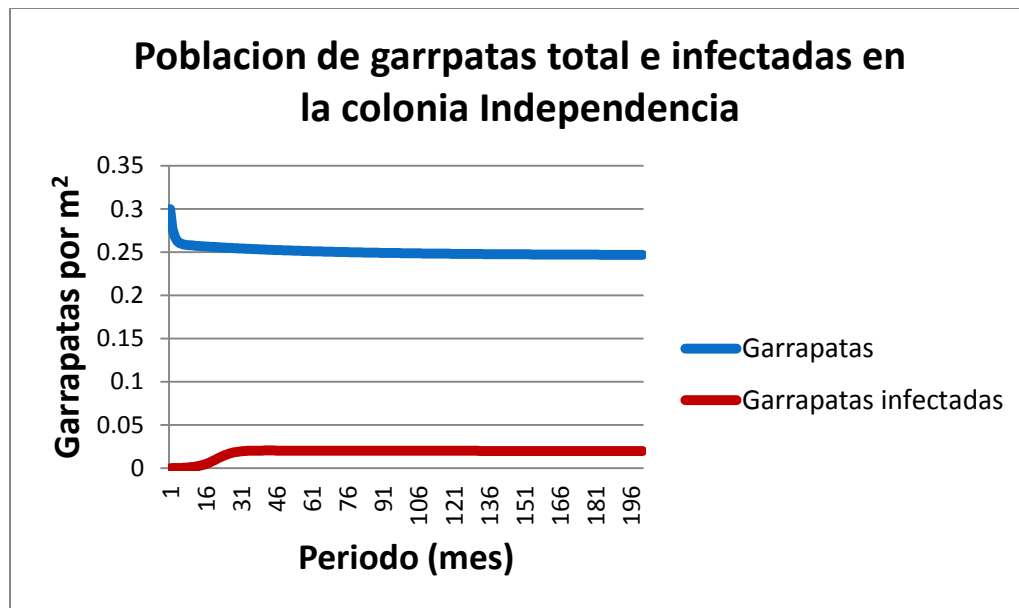
CAPITULO III

modelo predice que prácticamente todos los perros serian infectados por *Rickettsia* en los primeros ~35 meses del brote de infección.

La figura 19(b) muestra como la población total de garrapatas inicia con una cantidad de ~0.3 garrapatas por m^2 y disminuye de una forma drástica hasta ~0.25 por m^2 en los primeros ~10 meses, posteriormente decreciendo de una forma suave monótonamente sin revezar las 0.2 garrapatas por m^2 ; mientras que las infectadas suben hasta ~0.0250 garrapatas por m^2 , y después decrece de una forma monotonícamente suave y lenta.



(a)



(b)

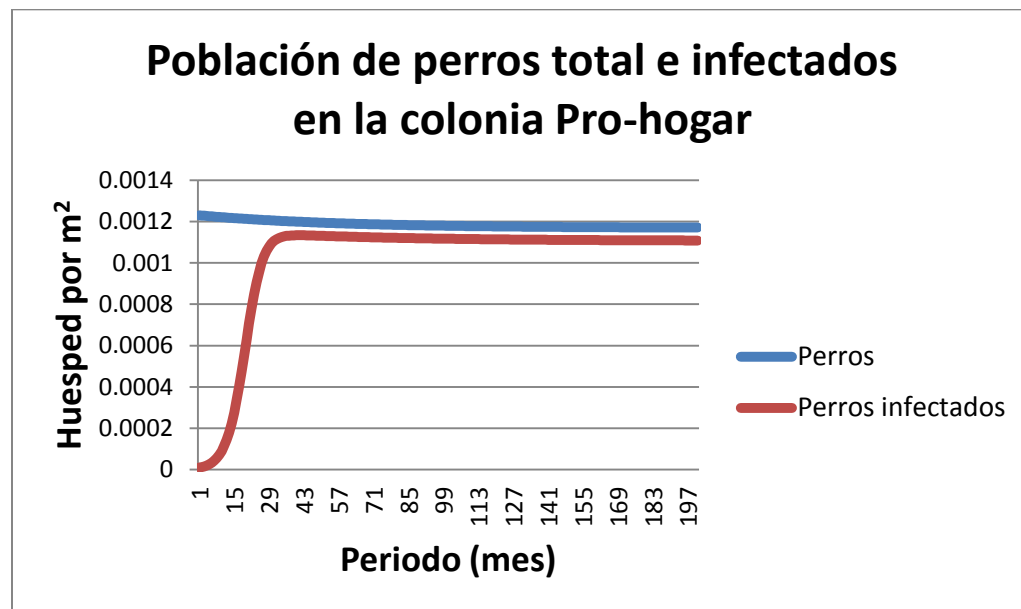
Figura 19. Comportamiento de las poblaciones de perros y garrapatas, tanto totales como infectadas, en la colonia Independencia.

3.5.3 Colonia Pro-hogar.

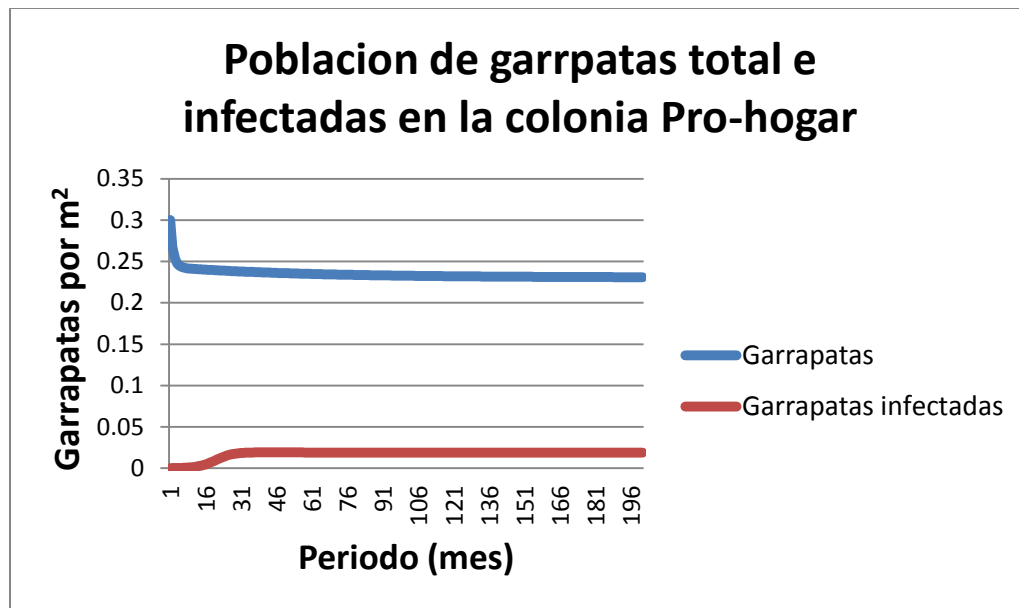
La figura 20 muestra el comportamiento de las poblaciones de perros y garrapatas, tanto totales como infectadas, por mes. En la figura 20(a) observamos como el total de perros en la colonia Pro-hogar parte de una población inicial de ~ 0.012 perros por m^2 y disminuye con respecto al tiempo de una forma suave y monotónicamente decreciente, con valores que no pasan por debajo de los 0.001 perros por m^2 en los primeros 200 meses, que equivale al comportamiento en 16.6 años; mientras que el total de perros infectados crece en los primeros ~ 35 meses hasta casi alcanzar el total de perros en la colonia y después decrece de una forma monotónicamente suave y lenta.

Esto nos indica, al igual que las colonias anteriores, que el modelo predice que prácticamente todos los perros serían infectados por *Rickettsia* en los primeros ~35 meses del brote de infección.

La figura 20(b) muestra como la población total de garrapatas inicia con una cantidad de ~0.3 garrapatas por m² y disminuye de una forma drástica hasta ~0.2 por m² en los primeros ~10 meses, posteriormente decrece de una forma suave monótonamente sin reversionar las 0.2 garrapatas por m²; mientras que las infectadas suben hasta ~0.024 garrapatas por m², y después decrecen de una forma monótonicamente suave y lenta.



(a)



(b)

Figura 20. Comportamiento de las poblaciones de perros y garrpatas, tanto totales como infectadas, en la colonia Independencia.

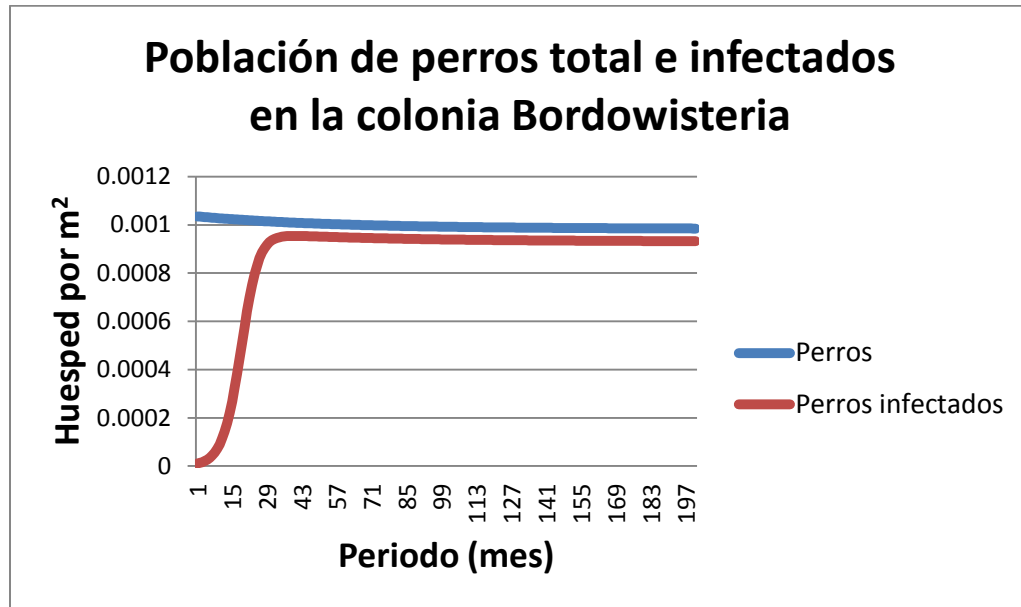
3.5.4 Colonia Bordowisteria.

La figura 21 muestra el comportamiento de las poblaciones de perros y garrpatas, tanto totales como infectadas, por mes. En la figura 21(a) observamos como el total de perros en la colonia Bordowisteria parte de una población inicial de ~ 0.01 pero por m^2 y disminuye con respecto al tiempo de una forma suave y monotónicamente decreciente, con valores que no pasan por debajo de los 0.0008 perros por m^2 en los primeros 200 meses, que equivale al comportamiento en 16.6 años; mientras que el total de perros infectados crece en los primeros ~ 35 meses hasta casi alcanzar el total de perros en la colonia y después decrece de una forma monotónicamente suave y lenta. Esto nos indica, al igual que las colonias anteriores, que el modelo predice que prácticamente todos los

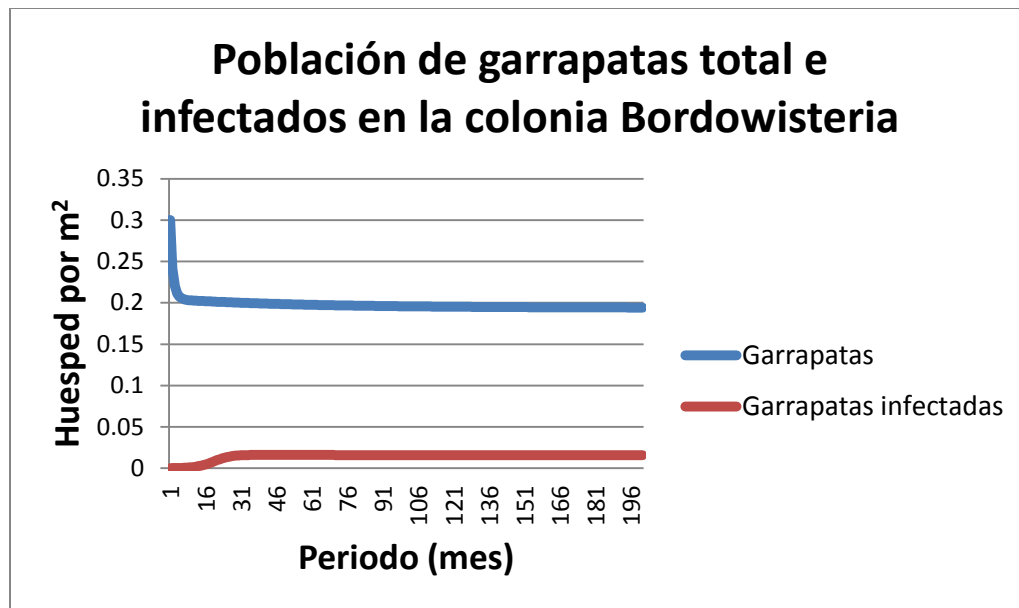
CAPITULO III

perros serian infectados por Rickettsia en los primeros ~35 meses del brote de infección.

La figura 21(b) muestra como la población total de garrapatas inicia con una cantidad de ~0.3 garrapatas por m² y disminuye de una forma drástica hasta ~0.2 por m² en los primeros ~10 meses, posteriormente decrece de una forma suave monótonamente sin reversionar las 0.018 garrapatas por m²; mientras que las infectadas suben hasta ~0.0161 garrapatas por m², y después decrece de una forma monótonicamente suave y lenta.



(a)



(b)

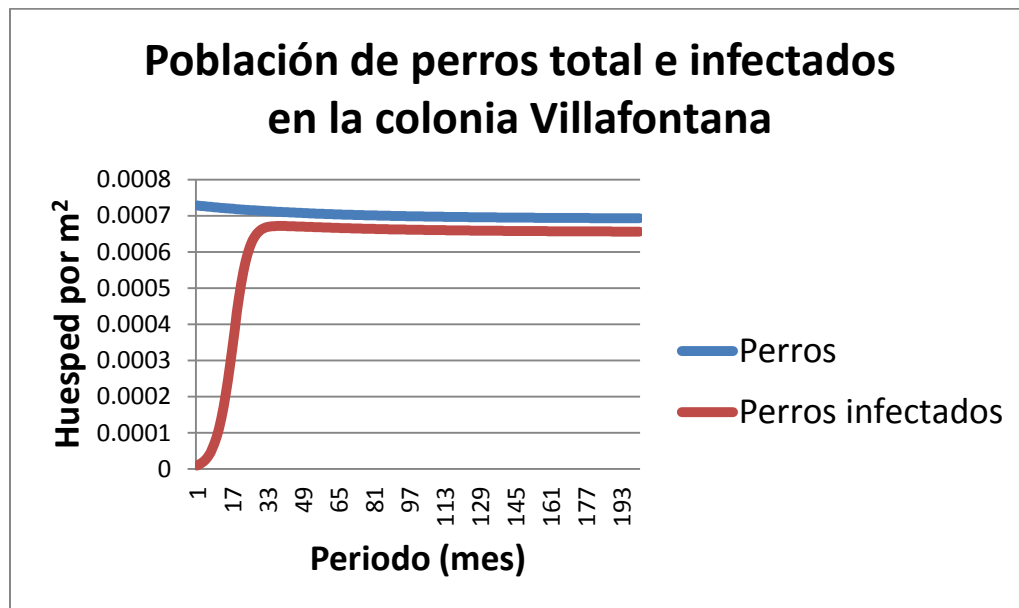
Figura 21. Comportamiento de las poblaciones de perros y garrapatas, tanto totales como infectadas, en la colonia Bordowisteria.

3.5.5 Colonia Villafontana.

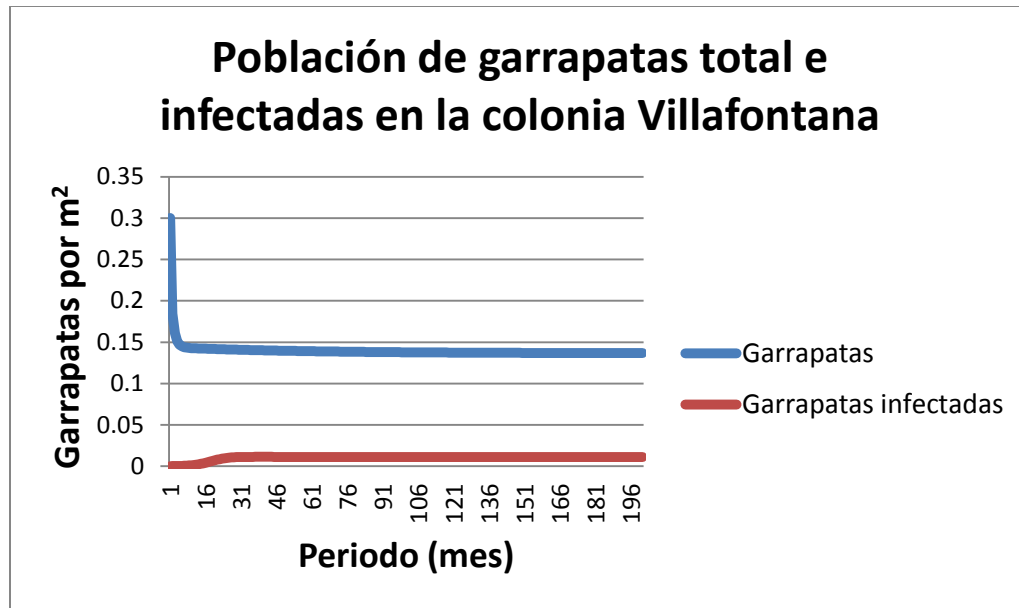
La figura 22 muestra el comportamiento de las poblaciones de perros y garrapatas, tanto totales como infectados, por mes. En la figura 22(a) observamos como el total de perros en la colonia Villafontana parte de una población inicial de ~ 0.0007 perros por m^2 y disminuye con respecto al tiempo de una forma suave y monotónicamente decreciente, con valores que no pasan por debajo de los 0.0006 perros por m^2 en los primeros 200 meses, que equivale al comportamiento en 16.6 años; mientras que el total de perros infectados crece en los primeros ~ 35 meses hasta casi alcanzar el total de perros en la colonia y después decrece de una forma monotónicamente suave y lenta. Esto nos indica,

al igual que las colonias anteriores, que el modelo predice que prácticamente todos los perros serían infectados por *Rickettsia* en los primeros ~35 meses del brote de infección.

La figura 22(b) muestra como la población total de garrapatas inicia con una cantidad de ~0.3 garrapatas por m² y disminuye de una forma drástica hasta ~0.15 por m² en los primeros ~10 meses, posteriormente decrece de una forma suave monótonamente sin revezar las 0.12 garrapatas por m²; mientras que las infectadas suben hasta ~0.0112 garrapatas por m², y después decrece de una forma monótonicamente suave y lenta.



(a)



(b)

Figura 22. Comportamiento de las poblaciones de perros y garrapatas, tanto totales como infectadas, en la colonia Villafontana.

Las tablas 13 y 14 muestran de forma concentrada el valor de las poblaciones totales e infectadas de los perros y las garrapatas en tres instantes en el tiempo.

Tabla 13. Población de perros totales e infectados en tres instantes en el tiempo

COLONIA	POBLACION	SUBPOBLACION	LINEA BASE	35 MESES	200 MESES
Cuauhtémoc	Perros	Total	1463	1429	1392
		Infectados	16	1347	1318
Independencia	Perros	Total	3763	3676	3581
		Infectados	29	3456	3391
Pro-hogar	Perros	Total	2062	2014	1962
		Infectados	17	1895	1858
Bordowisteria	Perros	Total	186	182	177
		Infectados	2	171	167
Villafontana	Perros	Total	942	920	896
		Infectados	13	868	849

CAPITULO III

Tabla 14. Población de garrapatas totales e infectadas en tres instantes en el tiempo

COLONIA	POBLACION	SUBPOBLACION	LINEA BASE	10 MESES	200 MESES
Cuauhtémoc	Garrapatas	Total	473100	286703	274728
		Infectadas	158	2513	22306
Independencia	Garrapatas	Total	858600	737398	706714
		Infectadas	286	4542	57381
Pro-hogar	Garrapatas	Total	502800	404050	387222
		Infectadas	168	2664	31440
Bordowisteria	Garrapatas	Total	53864	36412	34892
		Infectadas	18	286	2833
Villafontana	Garrapatas	Total	387900	184582	176864
		Infectadas	129	2057	14360

Los resultados de simulación muestran que el total de perros, en las cinco colonias, parten de una población inicial que varía con respecto al tiempo de una forma monotónicamente decreciente, y va desde un máximo de 3763 (colonia Independencia) a un mínimo de 167 (Colonia Bordowisteria), en los primeros 200 meses, después del brote de infección. Mientras que el número de perro infectados por Rickettsia parte de una población inicial dada por la capacidad de carga de perros en cada colonia y crece de una forma drástica en los primeros ~30 meses, hasta alcanzar, en promedio el 94.3% del total de perros en la colonia; posteriormente se mantiene decreciendo de forma monótona de forma proporcional al número total de perros en la colonia.

En cuanto a la población total de garrapatas, las cinco colonia presentan una disminución drástica de garrapatas en los primeros ~10 meses. Cantidad que va de un máximo de 858,600 garrapatas (Colonia Independencia) hasta un mínimo de 34,892 garrapatas (colonia Bordowisteria). Mientras que el número de garrapatas infectadas presenta un

CAPITULO III

aumento significativo en los primeros ~10 meses, hasta alcanzar, en promedio el 0.8% del total de garrapatas en la colonia; posteriormente se mantiene creciendo de forma monótona manteniendo la proporción al número total de garrapatas en la colonia.

IV CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

4.1 Conclusiones

Como objetivo general de este proyecto de tesis de maestría se propuso implementar un modelo epidemiológico para simular la infección por Ricktsiosis de garrapatas y perros en la ciudad de Mexicali, Baja California. Para lograr este objetivo, se estudiaron los modelos epidemiológicos determinísticos, de los cuales el Modelo de Gaff resultó ser el de mayor interés debido a que modela las tasas de cambio de las poblaciones totales de perros y garrapatas, y las tasas de cambio de las poblaciones infectada. Se implementó el modelo con datos reales de cinco colonias de la ciudad de Mexicali, y se resolvió utilizando el método de Runge Kutta de 4to. orden.

Utilizando información de la ciudad de Mexicali, obtenida tanto del instituto Nacional de Estadística y Geografía y de estudios de investigación previos, se estimaron 5 parámetros para cada una de las colonias del estudio. Los parámetros estimados fueron La superficie de las áreas afectadas, el tamaño de la población inicial, la tasa de crecimiento y la tasa de mortalidad de los parros, así como la capacidad de carga de perros por metro

cuadrado. Para el resto de los parámetros se utilizaron los mismos valores de trabajo original de Gaff, debido a la falta de información para estimarlos de la ciudad e Mexicali. Los resultados de simulación muestran un panorama general del comportamiento la infección por *Rickettsia* de perros y garrapatas en cinco colonias de la ciudad de Mexicali. Es importante mencionar que la cantidad de perros y garrapatas iniciales son estimaciones hechas bajo la premisa de que existe una relación proporcional fija entre el número de personas y el número de perros, y que los valores resultantes son aunados a las variables específicas del modelo. Las cantidades reales tanto de poblaciones totales como infectadas varia debido a que el número total de perros se ve afectado por distintos factores, tales como programa de control animal del gobierno, el control de natalidad de perros en hogares, el descontrol del nacimiento de perros que viven en las calles, entre otros; mientras que para las garrapatas, sabemos que estas pueden habitar no solo en los perros, sino en la tierra o en otras especies no consideradas en este estudio.

4.2 Trabajo futuro

En su estado actual, el trabajo modela de forma independiente escenarios de infección por *Rickettsia* de perros y garrapatas, bajo un modelo determinístico. Este tipo de modelo ofrece una visión general del comportamiento de la infección, sin embargo no considera aspectos aleatorios, o no determinísticos que rigen la realidad. Con el fin de mejorar la calidad de los resultados e integrar el trabajo realizado a la plataforma de simulación y prevención desarrollada por el consorcio de Una Frontera Una Salud, se propone el siguiente trabajo futuro:

1. Integrar al modelo la interacción del humano con los perros y garrapatas bajo el contacto de la ciudad de Mexicali, para poder estimar el impacto en l salud humana,
2. Generar el código del modelo en un lenguaje de programación adecuado para poder ser ejecutado en la Red (www),
3. Integrar el modelo codificado al Sistema Colaborativo Multisectorial para Simular la Dispersión de Patógenos en ambos lados de la frontera México-USA, desarrollado por el consorcio OBOH,
4. Implementar modelos de simulación no determinísticos, que consideren los aspectos aleatorios, que afectan el fenómeno.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Perfil Estatal Baja California. Principales causas de muerte del 2004 al 2010. Descargado de internet en 20 de enero de 2013.
http://www.cenapra.salud.gob.mx/interior/seguridad_vial_en_mexico/bajacalifornia-norte.pdf
- [2] Atlas de riesgos del Municipio de Mexicali, B.C. marzo-agosto de 2011. Número de obra: 020021ME042. Número de expediente: PROGRAMA HABITAT 2010. Consultor: Instituto de Investigaciones Sociales, UABC.
- [3] Boletín Epidemiológico Periódico. Rickettsias. Enero 2006. Ministerio de salud. Presidencia de la Nación.
- [4] Wong. L. Vigilancia Epidemiológica de rickettsiosis en Mexicali, B. C. (Presentación en PowerPoint). Epidemiología Estatal. Recuperado el 14 de enero de 2014 de:
http://www.saludbc.gob.mx/descargas/pandemia/Panorama_Rickettsiosi_2009_2010.pdf
- [5] Wikipedia. Rickettsia. Recuperado el 14 de enero de 2014 de:
<http://es.wikipedia.org/wiki/Rickettsia>.
- [6] Secretaria de Salud. Primera Edición, 2001. Programa de Acción Enfermedades Transmitidas por Vector.
- [7] Rojas, B.E. ACT:2001. La fuerza de la Innovación. Información Técnica para Médicos Veterinarios. Merial México, S.A. de C.V. Una compañía de Merck Sharp & Dohme y Aventis. Recuperado el 14 de enero del 2014 de:
<http://www.webveterinaria.com/merial/GarrapataII.pdf>
- [8] Quintero, V.J 1 ,Hidalgo, M, Rodas, González. J. 2012. Rickettsiosis, una enfermedad letal emergente y re-emergente en Colombia. Vol. 17 N° 1: 82-99. Recuperado el 14 de enero del 2014 de:
<http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/scientarium/article/viewFile/2485/1764>
- [9] J.A. Herrero, E. García-Vázquez, A. Hernández y J. Gómez. 2010. Infecciones por Rickettsias y fiebre Q. Servicio de Medicina Interna-Enfermedades Infecciosas. Hospital Universitario Virgen de la Arrixaca. Murcia. España.
- [10] Montesinos-López OA, Hernández-Suárez CM. 2007. Modelos matemáticos para enfermedades infecciosas. Salud Publica Mex; 49:218-226.
- [11] Guangping Huang and Ling Li. A mathematical model of infectious diseases. Annals of operations research, 168:41–80, 2008.
- [12] M.G. Roberts and J. A. P. Heesterbeek. 2003 Mathematical Models in Epidemiology in Mathematical Models. Eolss Publishers, Oxford, UK.
- [13] Gaff, H., & Gross, L. J. 2006. Modeling Tick-Borne Disease: A Metapopulation Model. Mathematical Biology , 69, 265-288.
- [14] Gaff, H., & Schaefer, E. 2010. Metapopulation Models in Tick-Borne Disease Transmission Modelling. Modelling parasite transmission and control (pp. 51-65). New York, N.Y.: Springer Science+Business Media ;.

- [15] Davidson, W.R., Siefken, D.A., Creekmore, L.H., 1994. Seasonal and annual abundance of *Amblyomma americanum* (Acari: Ixodidae) in central Georgia. *J. Med. Entomol.* 31, 67–71.
- [16] Mount, G.A., Haile, D.G., Barnard, D.R., Daniels, E., 1993. New version of LSTSIM for computer simulation of *Amblyomma americanum* (Acari: Ixodidae) population dynamics. *J. Med. Entomol.* 30, 843–857.
- [17] Lockhart, J.M., Davidson, W.R., Stallknecht, D.E., Dawson, J.E., 1996. Site-specific geographic association between *Amblyomma americanum* (Acari: Ixodidae) infestations and *Ehrlichia chaffeensis*-reactive (Rickettsiales: Ehrlichieae) antibodies in white-tailed deer. *J. Med. Entomol.* 33, 153–158.
- [18] Haile, D.G., Mount, G.A., 1987. Computer simulation of population dynamics of the lone star tick, *Amblyomma americanum* (Acari: Ixodidae). *J. Med. Entomol.* 24, 356–369.
- [19] Paddock, C.D., Childs, J.E., 2003. *Ehrlichia chaffeensis*: A prototypical emerging pathogen. *Clin. Microbiol. Rev.* 16, 37–64.
- [20] Ewing, S.A., Dawson, J.E., Kocan, A.A., Barker, R.W., Warner, C.K., Panciera, R.J., Fox, J.C., Kocan, K.M., Blouin, E.F., 1995. Experimental transmission of *Ehrlichia chaffeensis* (Rickettsiales: Ehrlichieae) among white-tailed deer by *Amblyomma americanum* (Acari: Ixodidae). *J. Med. Entomol.* 32, 368–374.
- [21] Zill, G., Dennis, C., Cullen, R., Michael, 2008. *Ecuaciones Diferenciales. Matemáticas Avanzadas Para Ingeniería, Vol.1.* Mc Graw Hill, Tercera edición. 280-286
- [22] INEGI (2000). XII Censo de Población y Vivienda 2000. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Recuperado el 14 de enero del 2014 de:
<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/consultainteractiva/Default2.aspx?c=10261&cl=1>
- [23] INEGI (2005). II Conteo de Población y Vivienda 2005. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Recuperado el 14 de enero del 2014 de:
<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/consultainteractiva/Default2.aspx?c=17352&cl=1>
- [24] INEGI (2010). XIII Censo de Población y Vivienda 2010. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Recuperado el 14 de enero del 2014 de:
http://www.inegi.org.mx/lib/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?#Regreso&c=27770
- [25] Wikipedia. Tasa de crecimiento poblacional. Recuperado el 14 de enero del 2014 de:
http://es.wikipedia.org/wiki/Crecimiento_poblacional
- [26] INEGI. 2012. Inventario Nacional de Viviendas. México: Instituto Nacional de Estadística, Geográfica e Informática. Recuperado el 14 de enero del 2014 de:
<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mapa/inv/Default.aspx>
- [27] INEGI. Mapa Digital de México. México: Instituto Nacional de Estadística, Geográfica e Informática. Recuperado el 14 de enero del 2014 de:

<http://gaia.inegi.org.mx/mdm5/viewer.html>

- [28] One Border One Health. A California-Baja California Network.
<http://www.oneborderonehealth.com/>
- [29] One Health Initiative. <http://www.onehealthinitiative.com/>
- [30] Villa-Angulo Rafael. Progres on a One Border One Health binational, multi-sectorial collaborative system fo simulating the spread of pathogens at the USA-Mexico frontier. Proceeding s of the PMAC 2013, Tailandia.
- [31] Daniel B. Fishbein, et all., Prevention of canine rabies in rural Mexico: An epidemiologic study of vaccination campaings. Trop. Me. Hyg., 47(3), 19.