ACERCAMIENTOS A LA ENFERMEDAD DE CHAGAS EN EL DEPARTAMENTO DE CASANARE, COLOMBIA A TRAVÉS DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS

DANIEL ANDRÉS AMAYA MUVDI

Asesor
LUIS PINZÓN

Co-Asesor
JUAN MANUEL CORDOVÉZ

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
BOGOTÁ D.C.
27 DE NOVIEMBRE DE 2015

Tabla de contenido

1 INTRODUCCIÓN 3

2 MARCO TEÓRICO 4

2.1 Introducción General a la Enfermedad de Chagas 4

3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 6

3.1 Situación Actual en Colombia 7

3.2 Situación Actual en el Casanare 9

4 OBJETIVOS 11

4.1 Objetivos Generales 11

4.2 Objetivos Específicos 11

5 METODOLOGÍA 12

6 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO 13

6.1 Paso 1: Modelo Básico Vector-Huesped. 14

6.2 Paso 2: Discriminar ambos estados de infección en humanos. 15

6.3 Paso 3: Agregar dinámicas poblacionales. 16

6.4 Paso 4: Agregar comportamientos adicionales que se quieren estudiar. 17

6.5 Modelo Matemático para la enfermedad de Chagas. 18

7 VARIABLES RELEVANTES DEL PROBLEMA 19

7.1 Población del Casanare 20

7.2 Insectos triatominos domésticos 21

7.3 Calidad del hogar 22

7.4 Tratamiento con rociamiento 23

7.5 Tratamiento médico 23

8 RESULTADOS 24

8.1 La Matriz de la Próxima Generación 26

8.2 Virulencia y Número Básico de Reproducción 28

8.3 Equilibrio endémico 31

9 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN 32

9.1 Comportamientos de alternativas 32

9.1.1 Comportamiento al variar la efectividad del rociamiento 32

9.1.2 Comportamiento al variar la efectividad de medicamento 35

9.1.3 Comportamiento al variar la población inicial de vectores 37

9.1.4 Comportamientos neutrales 40

9.1.5 Conclusión de alternativas 41

9.2 Estudiar el ciclo silvestre 41

9.2.1 Reservas Silvestres 42

9.2.2 Deforestación del Casanare y Plantación de Palma Africana 42

10 ACTORES RELEVANTES 43

10.1 Ministerio de Salud y Autoridades Municipales 44

10.2 Universidades 44

10.3 Habitantes del Casanare 45

11 CONCLUSIONES 46

11.1 Costos Asociados a las Alternativas 46

11.2 Tendencia a la baja en Casanare 47

12 REFERENCIAS 49

1 Introducción

La enfermedad de Chagas es causada por el parásito *Trypanosoma* cruzi al ser transmitida a humanos por insectos conocidos como "pitos" que se encuentren infectados (Erazo & Cordovéz, 2011). Esta enfermedad es una problemática creciente en Latinoamérica, en donde mueren más 15,000 personas al año por esta causa (Clayton, 2010). Colombia es uno de los países más afectados, en donde se encuentran aproximadamente 700,000 habitantes infectados (Padilla, 2005). El único control efectivo existente actualmente en Colombia consiste en el análisis de sangre antes de transfusión que (aunque efectivo) no es suficiente (Nicholls, 2005). Por otro lado, existen tratamientos con drogas después de detectar la enfermedad, pero los resultados positivos son escasos (Tarleton, 2013).

Una de las zonas más afectadas en Colombia por esta enfermedad es el departamento del Casanare (Instituto Nacional de Salud, 2012). Pues a este se le suma el factor que el insecto transmisor *Rhodinus prolixus* se encuentre altamente asociado con la palma de aceite (World Health Organization, 2002), cultivo relevante para la economía del departamento (Fedepalma, 2014).

Bajo este panorama, resulta pertinente atacar el problema de la enfermedad antes de que se transmita, es decir, que haya un control preventivo de transmisión de la enfermedad en los hogares de las personas susceptibles. Aún no se ha incorporado a Colombia un plan de tal propósito puesto que no se ha encontrado un programa que se compruebe efectivo (Nicholls, 2005). Sin embargo, actualmente están latentes dos posibles alternativas de control: la fumigación de los hogares y la mejora de la calidad de la vivienda (Silveira, 2005).

Las relaciones que se crean entre los insectos transmisores y los humanos para la reproducción de la enfermedad es lo suficientemente compleja como para realizar aproximaciones a partir de las distribuciones poblacionales de uno u otro actor (Cordovez, et. al., 2014). Se estaría hablando en este caso de sistemas de realimentación, pues una mayor cantidad de insectos infectados genera una mayor cantidad de personas infectadas y viceversa. Si a este sistema se le suma el análisis de alternativas de control como el rociamiento de viviendas, el mejoramiento de la calidad de estas o el tratamiento con drogas a la enfermedad, las relaciones son lo suficientemente complejas para poderlas estudiar a través de la herramienta de *dinámica de sistemas*.

La dinámica de sistemas busca comprender a través de simulaciones el cambio en el comportamiento de las diferentes partes que interactúan en el modelo al tomar distintas decisiones de acción (Sterman, 2000). Para el caso de la enfermedad de Chagas en el Casanare, con esta herramienta se buscará comprender en cambio en la cantidad de persona infectadas cuando se toman decisiones sobre las distintas alternativas de control.

Para este objetivo, se contará además con un concepto ampliamente utilizado en la dinámica de sistemas que modelan enfermedades: el *número básico de reproducción*. Determinar este factor ayudará a esclarecer las situaciones en las cuales la enfermedad puede ser erradicada de la población y las situaciones en las cuales se establece de manera endémica (Brauer & Castillo-Chavez, 2010).

Por consiguiente, primero encontrará el marco teórico de la enfermedad y la manera en que esta ha afectado a la población colombiana y en específico a la del Casanare. A partir de esta información se construye el modelo que representa la dinámica de la enfermedad en esta situación. Dicho modelo será complementado con el cálculo del número básico de reproducción. Con estas dos herramientas se hace énfasis en el estudio del cambio en el comportamiento de la población infectada al tomar las distintas alternativas de control. Con base en estas simulaciones se propondrán políticas de acción, acompañadas de las consideraciones que se deben tener para que se puedan llevar a cabo satisfactoriamente.

2 Marco Teórico

En este capítulo se busca dar una descripción de la enfermedad de Chagas, para entender con mayor propiedad el desarrollo del modelo que tiene como fin representar la situación actual de la enfermedad en el departamento del Casanare en Colombia.

2.1 Introducción General a la Enfermedad de Chagas

La enfermedad de Chagas –o tripanosomiasis americana- es una enfermedad parasitaria crónica causada por el *Trypanosoma cruzi* (*T. cruzi*). Este parásito normalmente se transmite al huésped vertebrado (mamíferos y humanos) a través de insectos –vectores- triatominos en el momento que perforan la piel para succionar la sangre que los alimenta. El *T. cruzi* también puede transmitirse por infección congénita –de la madre al feto-, por transfusión de sangre contaminada o por el trasplante de órganos contaminados (Guhl, Enfermedad de Chagas, 2000).

Desde su descubrimiento, la enfermedad de Chagas ha estado altamente relacionada con el desarrollo económico y social de la población: la pobreza, la vivienda inadecuada, la ignorancia, el analfabetismo, la migración frecuente de personas y la rápida urbanización se han citado como factores que producen la enfermedad, más allá del vector y el parásito (Briceño-León, 2007). Es por esto que dicha enfermedad presenta un grave problema de salud en los países latinoamericanos pues, al sumarle que es endémica en esta región, se estima que alrededor de 10 millones de latinoamericanos están infectados y mueren más de 15,000 al año por esta enfermedad (Clayton, 2010). Más aún, se

estima que cada año se infectan alrededor de 500,000 personas en esta región, de las cuales 300,000 son niños menores a 15 años de edad (Guhl, Enfermedad de Chagas, 2000).

Por consiguiente, es evidente que Colombia, al ser un país de América Lantina, se encuentra frente a una problemática de salud que resulta necesario atacar. Pero bien, antes de ir a guerra hay que conocer al enemigo, por lo tanto se presenta a continuación una descripción general de la enfermedad.

Para comenzar, se reconocen tres fases en la enfermedad de Chagas: existe una **fase aguda** de corta duración y una **fase crónica** de larga duración separadas por una fase clínicamente asintomática que se conoce como **fase intermedia** (Guhl, Enfermedad de Chagas, 2000)**.**

Fase Aguda
Esta fase comienza en el momento en que el insecto vector infectado perfora la piel de la persona, introduciendo el parásito *T. cruzi* (World Health Organization, 2002). Esta fase puede ocurrir a cualquier edad y tarda entre 6 a 8 semanas en las cuales se presentan síntomas leves y atípicos (Guhl, Enfermedad de Chagas, 2000), razón por la cual detección de la enfermedad en esta fase es apenas de un 2% (World Health Organization, 2002).

Fase Intermedia
Esta fase se sigue inmediatamente después de acabar la fase aguda. Aunque realmente la enfermedad de Chagas posee solamente las fases aguda y crónica, se reconoce esta fase intermedia como un subestado de la fase crónica donde no se presentan manifestaciones clínicas. Más aún, del 50% al 70% de los infectados permanecerá es este estado asintomático por el resto de su vida (World Health Organization, 2002). Consecuentemente, al no estar consientes los pacientes de estar infectados, durante este largo periodo de tiempo constituyen “un importante reservorio de la infección y contribuyen a mantener el ciclo vital del parásito” (Guhl, Enfermedad de Chagas, 2000).

Fase Crónica
Se reconoce la fase crónica en el momento que la persona infectada desarrolla síntomas cardiacos, digestivos o neurológicos que conducen a muertes repentinas. Dichos síntomas tienden a aparecer después de 10 a 20 años de haber contraído la enfermedad (Guhl, Enfermedad de Chagas, 2000).

Estudiando la enfermedad de Chagas también se identifican tres escenarios diferentes para la transmisión del *T. cruzi* altamente relacionados con la morbilidad en los seres humanos, conocidos ampliamente como “ciclos de transmisión” (Guhl, Epidemología, 2007). Estos son el ciclo silvestre, peridoméstico y doméstico.

Ciclo Silvestre
En este ciclo intervienen los vectores triatominos que infectan y a la vez se infectan de los roedores, marsupiales y otros pequeños animales salvajes

como armadillos y murciélagos. Ahondando un poco más, a lo largo de los países de centroamérica y suramérica se han descubierto más de 180 especies de pequeños mamíferos salvajes que son infectados de forma natural por el parásito *T. cruzi* (Guhl, Epidemología, 2007).

Ciclo Peridoméstico
Este ciclo sirve como conector entre los ciclos doméstico y silvestre. En este escenario, los vectores triatominos selváticos son atraídos a las casas por las fuentes de sangre que residen en la gran cantidad de pequeños animales como roedores, marsupiales, perros y gallinas que se encuentran en las cercanías de las viviendas.

Ciclo Doméstico
Este ciclo nace de la intervención del hombre en la cadena selvática del *T. cruzi* a través de los proceso de colonización por actividades principalmente agrícolas que invaden el bosque, obligando a la domiciliación de los insectos vectores (Guhl, Estado actual, 1999).

En este ciclo los principales reservorios del parásito son los seres humanos, los perros y la alta gama de animales en los alrededores domésticos que se encuentran en estas zonas, lo que perpetúa la infección en seres humanos y causa su alta morbilidad (Guhl, Epidemología, 2007).

Para finalizar este primer acercamiento a la descripción de la enfermedad de Chagas es acertado aclarar que no se puede pretender la completa erradicación de la transmisión de la enfermedad. La transmisión en el ambiente silvestre seguirá sucediendo pues la diversidad de reservorios implica una imposibilidad en el agotamiento de fuentes de sangre para los vectores, lo cual podría eventualmente ser el gestor de infecciones humanas. Sumado a esto, actualmente no existen medios de protección por inmunización para individuos susceptibles a la enfermedad (Silveira, 2005). Por si fuera poco, los únicos medicamentos disponibles se desarrollaron hace más de 50 años atrás, solamente funcionan para tratar a pacientes en fase aguda, son relativamente eficaces y presentan efectos secundarios al aplicarlos en jóvenes entre los 0 y 16 años de edad (Guhl, Enfermedad de Chagas, 2000).

3 Descripción del Problema

Luego de haber comprendido a grandes rasgos las características principales de la enfermedad de Chagas, la pregunta natural viene a ser ¿cómo se encuentra Colombia frente a esta situación? El propósito de este capítulo será dar respuesta a esta pregunta, a la vez que se justifica por qué se puede considerar la enfermedad de Chagas como una situación problemática en el departamento de Casanare, Colombia.

3.1 Situación Actual en Colombia

A nivel de cifras se estima que cerca del 5% de la población colombiana está infectada con *T. cruzi* y cerca del 20% se encuentra en riesgo de adquirir la infección (Guhl, Enfermedad de Chagas, 2000). Esto se traduce en que alrededor de 700,000 personas están infectadas en el país, de las cuales cerca de 37,500 son niños menores de 15 años de edad (Padilla, 2005). Más aún, se estima que la cantidad de nuevos casos por transmisión es aproximadamente de 5,000 personas por año (Instituto Nacional de Salud, 2012).

Con esta problemática latente, en el año 1995 el Ministerio de Salud convocó una reunión de expertos en el enfermedad de Chagas para elaborar un plan de Prevención y Control. A partir de esta iniciativa en 1995 se expide el decreto para el control nacional de bancos de sangre (Guhl, Estado actual, 1999), la cual ha llegado a ser muy efectiva pues hoy en día hay un cubrimiento del 100% de los bancos de sangre colombianos con un índice de apenas el 0.44% de prevalencia de la enfermedad en dichos bancos (Moncayo & Silveira, 2009).

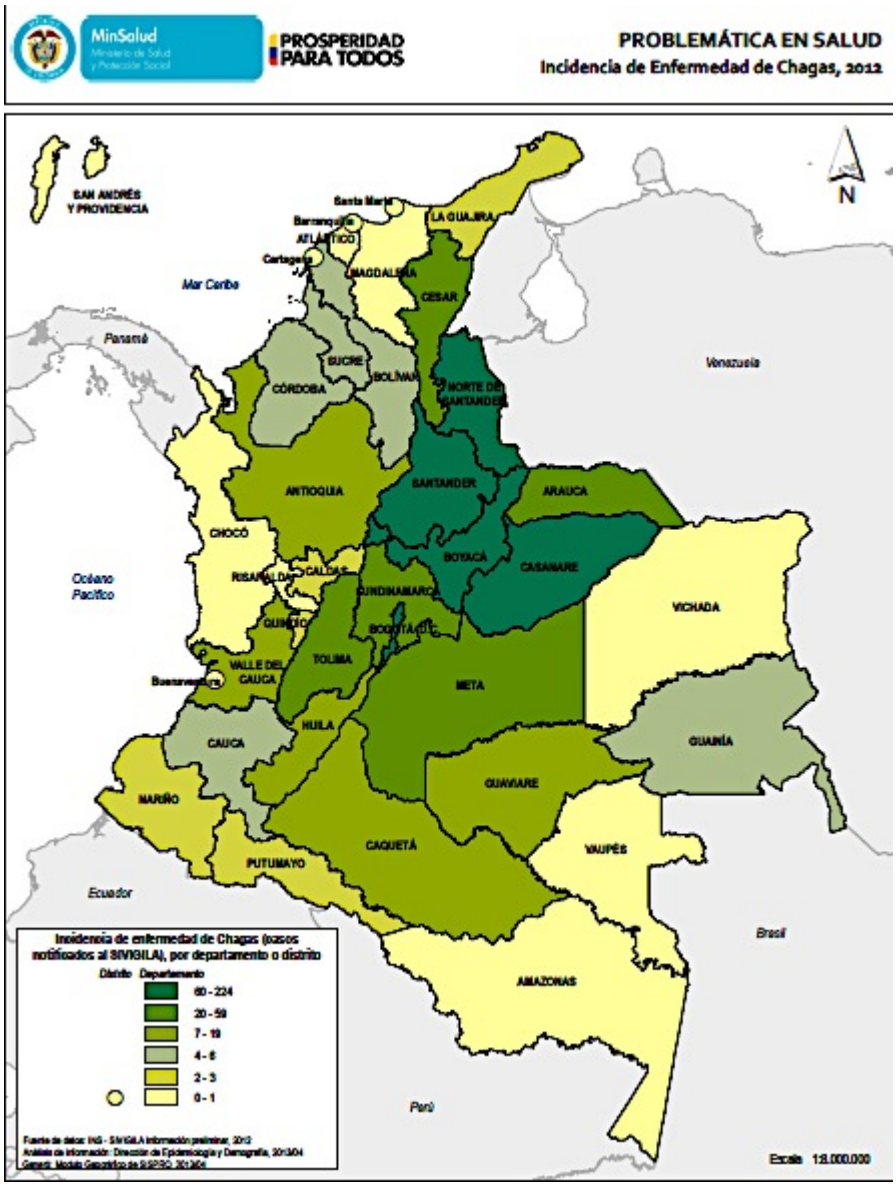
Más tarde, en 1998, el Ministerio de Salud emprende el Programa Nacional de Prevención y Control a la Enfermedad de Chagas, el cual consistía en tres fases: recolección de datos, elaboración del plan y aplicación del programa (Guhl, Estado actual, 1999). Este programa culminó su fase exploratoria en el año 2000, la cual consistió en la caracterización de 539 municipios en 15 departamentos según su condición de riesgo (Guhl, et. al., 2003).

Los resultados de esta primera fase se pueden evidenciar en la Tabla 1. En esta tabla se encuentra la cantidad de municipios y cantidad de personas que se encuentran en riesgo de infección por la enfermedad. Más aún, junto con el Mapa 1, se puede observar cómo se distribuye el nivel de riesgo de infección a lo largo del país, notado que los municipios con mayor riesgo se encuentran en la zona nororiental del país, específicamente los municipios que se encuentran en los departamentos de Norte de Santander, Santander, Boyacá y Casanare. No deja de ser preocupante notar que la mayoría de departamentos del país se encuentran en un nivel alto o mediano de infección.

MUNICIPIOS Y POBLACIÓN DE ALTO, MEDIANO Y BAJO RIESGO DE INFECCIÓN POR *TRYPANOSOMA CRUZI*

Total municipios en alto riesgo	122	Total población en alto riesgo	1,321,288
Total municipios en mediano riesgo	184	Total población en mediano riesgo	5,698,797
Total municipios en bajo riesgo	252	Total población en bajo riesgo	7,252,536

Tabla 1: Total municipios y población de alto, mediano y bajo riesgo de infección por *Trypanosoma cruzi* (Guhl, Epidemología, 2007).



Mapa 1: Inicidencia de la enfermedad de Chagas por departamento (Instituto Nacional de Salud, 2012). Entre más oscuro el color, mayor el nivel de riesgo de infección por *T. cruzi*.

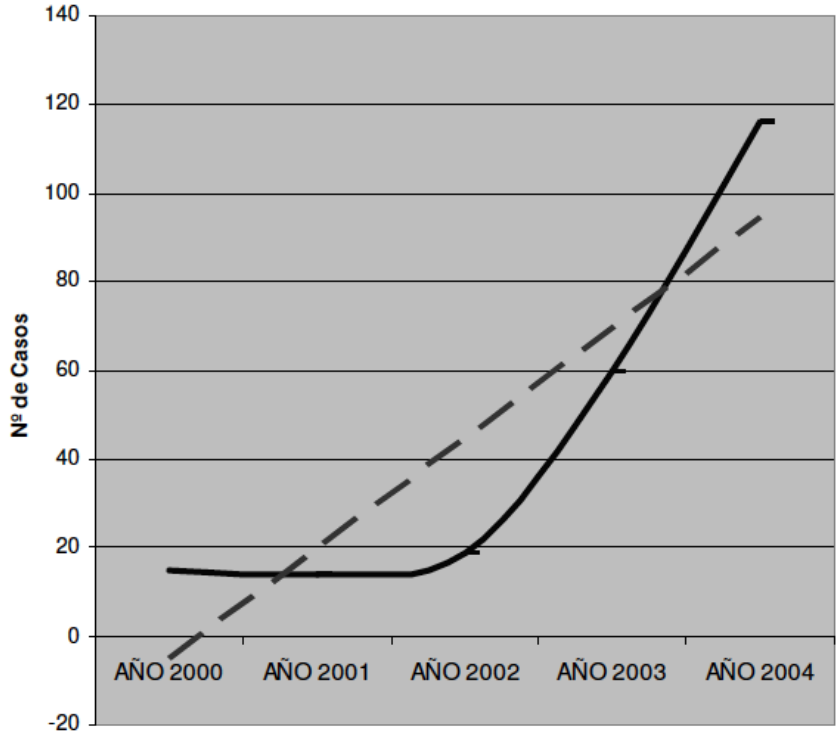
A pesar de una efectiva primera fase, el Ministerio de Salud y Protección social ha perjudicado en gran medida las acciones de control a las enfermedades de transmisión vectorial –en general- por falta de una adecuada coordinación y definición de políticas claras al respecto (Guhl, et. al., 2003). La razón principal a esta falla se puede adjudicar al hecho que el largo periodo de cronicidad de la enfermedad produce muy poca demanda social de servicios de asistencia médica resultando en un grado de abandono e indiferencia por parte del Estado (Guhl, Enfermedad de Chagas, 2007).

No obstante, un estudio realizado en Brasil el cual tomaba en cuenta los costos por disminución de la productividad en el campo por parte de los individuos infectados con la enfermedad de Chagas y las pérdidas económicas por la muerte de estos antes de llegar a su edad de jubilación demostraron que en las 14,022 muertes por enfermedad de Chagas entre los años 1979-1981 se perdieron aproximadamente 259,152 años de vida productiva, lo cual se traducía a un total en pérdida económica de US$237 millones. (Moncayo & Silveira, 2009). Dicho estudio da un visión a los posibles costos que se pueden estar incurriendo en Colombia por falta de un programa atractivo de prevención y control a la enfermedad de Chagas.

Para resumir, ”Ante la imposibilidad de plantear programas de erradicación de esta especie y de la necesidad de desarrollar programas de control sostenibles a largo plazo se hace necesario identificar metodologías de intervención y de vigilancia que resulten altamente efectivas y costo-manejables por programas de control” (Angulo Silva, 2005). En otras palabras, debido a la cantidad de infectados al año en Colombia que presenta esta enfermedad y a los costos en productividad del campo que estos conllevan, resulta imperativo encontrar mecanismos de prevención a la transmisión de la enfermedad de Chagas que sean efectivos y económicamente atractivo para el Estado.

3.2 Situación Actual en el Casanare

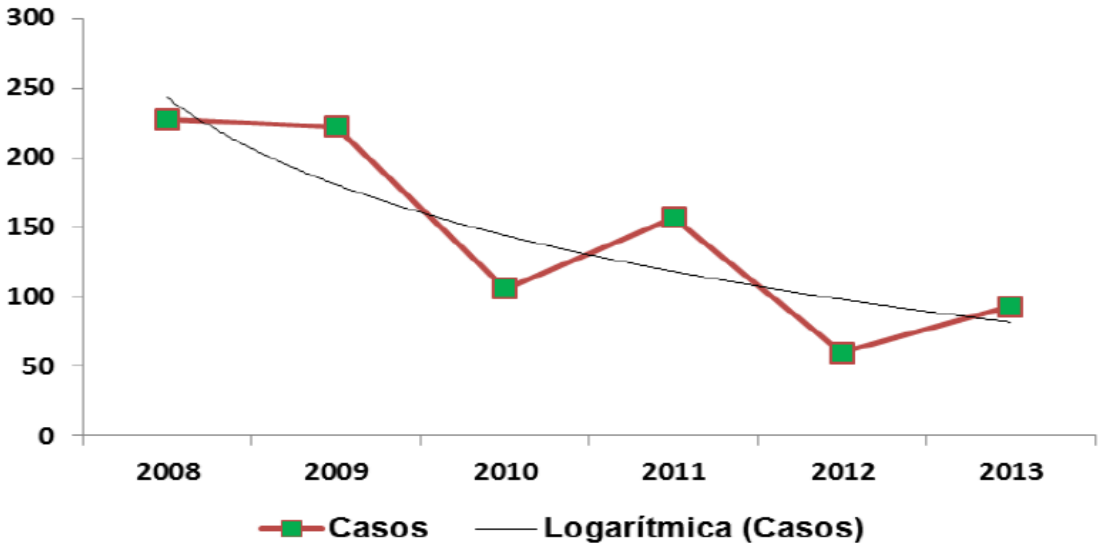
Teniendo en cuenta que las características que definen a cada departamento del país varían considerablemente –geografía, temperatura, actividades principales de ingresos económicos, precipitaciones, nivel de pobreza, tasas de migración, vegetación, entre otras- y que cada una de estas variables influye sobre el comportamiento de la enfermedad (Cordovéz, 1997), resultaría altamente complejo estudiar su epidemiología a nivel de país, por tal motivo se escogió un departamento específico para su estudio. El departamento seleccionado fue el Casanare.



Gráfica 1: Resultados sobre la tendencia de crecimiento de la enfermedad de Chagas en el departamento de Casanare entre los años 2000 y 2004 (Secretaría de Salud de Casanare, 2005). La línea continua representa el comportamiento del número de casos registrados. Mientras que la línea puntuada indica la tendencia creciente del número de casos.

Existen tres principales razones por las cuales el departamento del Casanare fue el escogido para este estudio. La primera y más evidente se encuentra en el Mapa 1 presentado anteriormente, donde se evidencia que este departamento se encuentra entre los cuatro de mayor nivel de riesgo de infección. La segunda razón consiste en un escenario común para el departamento del Casanare pero no para los otros tres departamentos de alto nivel de riesgo. Dicho escenario es el cultivo de las palmas de aceite (o palma africana) como sustento económico de la región (Fedepalma, 2014) y la cercanía que tienen las viviendas a las palmas de vino (*Attalea butyracea*) pues los habitantes de la región usan estas como protección a la luz solar. El problema se encuentra en que estas palmas son un hábitat natural para los vectores triatominos (Erazo & Cordovéz, 2011).

La última razón radica en el comportamiento que ha tenido la enfermedad en los últimos 12 años. Para explicar mejor esto, se puede observar primero en la Gráfica 1 que entre los años 2000 y 2004 la enfermedad tenía una tendencia creciente en el departamento; sin embargo, en la Gráfica 2 se aprecia que esta tendencia cambia a decreciente entre los años 2008 y 2013. Por lo tanto sería interesante poder entender por qué los infectados en este departamento presentan este comportamiento.



Gráfica 2: Casos crónicos de la enfermedad de Chagas notificados en el departamento de Casanare entre los años 2008 y 2013 (Secretaría de Salud Departamental de Casanare, 2013). La línea gruesa representa el comportamiento del número de casos registrados. Mientras que la línea delgada indica la tendencia decreciente del número de casos.

4 Objetivos

4.1 Objetivos Generales

Encontrar mecanismos de prevención a la transmisión de la enfermedad de Chagas en el departamento de Casanare, Colombia. Dichos mecanismos deben estar encaminados a reducir la mortalidad humana; se deben poder hacer efectivos en un periodo establecido; a la vez que se presenten económicamente viables para realizarse y sean capaces de reducir los costos directos e indirectos asociados a la enfermedad (Panamerican Health Organization, 2010).

4.2 Objetivos Específicos

Con el fin de lograr el objetivo general de este trabajo, se han planteado varios objetivos específicos a cumplir.

- Construir un modelo conceptual que permita comprender las dinámicas existentes en el comportamiento de la cantidad de habitantes infectados por la enfermedad de Chagas en el departamento de Casanare, Colombia.

- Realizar un estudio a las dinámicas relacionadas con la cantidad de habitantes infectados por la enfermedad de Chagas en el departamento de Casanare, Colombia, para comprender su relación con las acciones del gobierno, la población rural y otras entidades involucradas.

- Evaluar cómo distintos posibles escenarios de acción pueden cambiar el comportamiento de la cantidad de habitantes infectados por la enfermedad de Chagas en el departamento de Casanare, Colombia.

- Diseñar estrategias efectivas para prevenir la transmisión de la enfermedad de Chagas en la población de Casanare, Colombia, que sean en lo posible económicamente atractivas para el Estado.

5 Metodología

La dinámica de sistemas es una metodología para el estudio y el manejo de sistemas complejos. Los cuales consisten en varias variables interconectadas entre sí de tal manera que el cambio en el valor de una de estas variables afecta los resultados de las demás (Sterman, 2000, p. 5). Estos sistemas se estudian a través de modelos dinámicos, los cuales consisten en representaciones que identifican el cambio en el tiempo dentro de la conducta dinámica de un sistema (Lagarda, 2011).

Esta herramienta ha resultado práctica para los creadores de políticas que buscan problemas específicos dentro de un sistema. Pues permite visualizar los efectos que pueden tener la aplicación de ciertas políticas. Los cuales pueden creerse efectivos, pero resultar contrarios al comportamiento esperado (Sterman, 2000, p. 10).

Usando esta área de estudio se buscará dar respuesta a preguntas como ¿cuántos individuos se verán afectados por la enfermedad de Chagas? ¿Qué clase de tratamientos serán efectivos? ¿Cuántas personas requerirán de estos tratamientos para que desaparezca la enfermedad? (Brauer & Castillo-Chavez, 2010, p. 347).

Dentro de la dinámica de sistemas, el modelamiento matemático permite comprender los mecanismos que actúan sobre la propagación de una enfermedad. Entonces, al poder desglosar la manera de actuar de la enfermedad, se pueden sugerir estrategias de control. Más aún, estos modelos ayudan a identificar comportamientos que pueden no ser evidentes cuando se analizan directamente los datos experimentales. Principalmente porque los datos empíricos están sujetos a errores en la medición, al tamaño de la muestra y a ser no-reproducibles (2010, p. 348).

Sin embargo, al usar modelos matemáticos, por su simpleza, hay que ser conscientes que se está renunciando a los detalles y estos solamente resaltarán el comportamiento macro, general. Esto pues modelos más detallados se hacen más complejos, por consiguiente resolverlos analíticamente se hace casi imposible, perdiendo así su utilidad para propósitos teóricos. Cuando se agregan datos, se pierde en teoría, pero se gana en construcción de estrategias. (2010, p. 348). Por esta razón, la idea será trabajar lo más que se pueda en el área teórica, para luego añadir datos y crear estrategias.

Dentro de los modelos en el área de la dinámica de sistemas existen los modelos compartimentales. Donde la población bajo estudio es dividida en compartimentos a partir de las características que se quieren estudiar. Los individuos pasan de un bloque a otro bajo supuestos sobre la naturaleza y tiempo en las tasas de transferencia. De esta manera el estudio se enfoca en tratar aquellos aspectos que se consideran relevantes en cada situación (2010, p. 349).

Uno de los resultados fundamentales de estos modelos epidemiológicos es la existencia de un comportamiento tipo “umbral”. Para las enfermedades endémicas – que es el caso de la enfermedad de Chagas en Colombia – este umbral se puede interpretar de la siguiente manera: si un sujeto infectado transmite su infección a secundarios con un promedio menor a uno, entonces la infección eventualmente desaparecerá; pero si este promedio es mayor a uno, entonces la enfermedad se establece en la región (2010, p. 412).

Este umbral lleva el nombre de *número básico de reproducción* y se halla calculando la cantidad de infectados secundarios que un solo individuo infectado puede causar si es introducido en una población completamente susceptible a la enfermedad (2010, p. 353). En este punto es importante hacer énfasis en el hecho que para hallar la capacidad de la enfermedad para asentarse en una población, se asume que esta inicialmente se encuentra completamente libre de la enfermedad pero es en su totalidad susceptible a esta.

El estudio de este umbral va a ser el eje central de este trabajo, pues al juntar los resultados teóricos que puedan resultar de los modelos matemáticos con la información cuantitativa que se tiene de esta enfermedad, se puede estimar la efectividad que pueden tener ciertas acciones sobre la enfermedad (2010, p. 349). Más aún, se logra tener una aproximación a la cantidad de control requerida para poder erradicar la enfermedad del área (Cordovez, et. al., 2014).

6 Construcción del Modelo

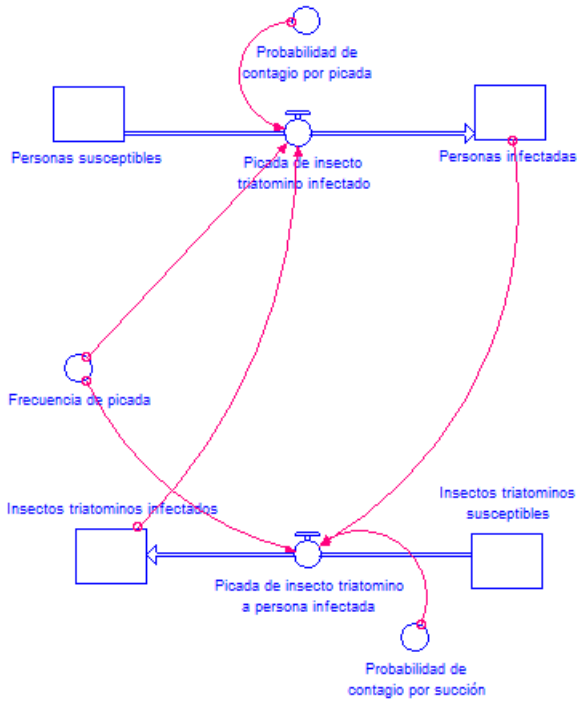
En un modelo compartimental para la transmisión de enfermedades, se agrupan los individuos en compartimentos, basando cada bloque en un único estado discreto.

Actualmente existe un modelo compartimental base para las enfermedades que necesitan de un vector para ser transmitidas. Este modelo lleva el nombre de "Modelo Vector-Huesped". A continuación se presentará este modelo y se irá construyendo sobre este, adaptándolo para que refleje la situación específica que se quiere trabajar en este proyecto. Aunque el lector que comprenda esta construcción puede pasar directamente a la sección 6.5.

6.1 Paso 1: Modelo Básico Vector-Huesped.

El modelo vector-huesped en su presentación más básica consiste de cuatro compartimentos. Dos de estos corresponden a los agentes infectados: huéspedes y vectores. Los restantes dos corresponden a los agentes susceptibles: huéspedes y vectores. La dinámica consiste en que los huéspedes susceptibles son infectados cuando entran en contacto con los vectores infectados. De manera similar, los vectores susceptibles son infectados cuando entran en contacto con los huéspedes infectados (van den Driessche & Watmough, 2002).

Para el caso de la enfermedad de Chagas, los huéspedes son las personas habitantes del Casanare. Mientras que los vectores son los insectos triatominos que tienen la capacidad de cargar con el virus, los *R. prolixus.* Este primer paso del modelo se presenta en la gráfica 3.

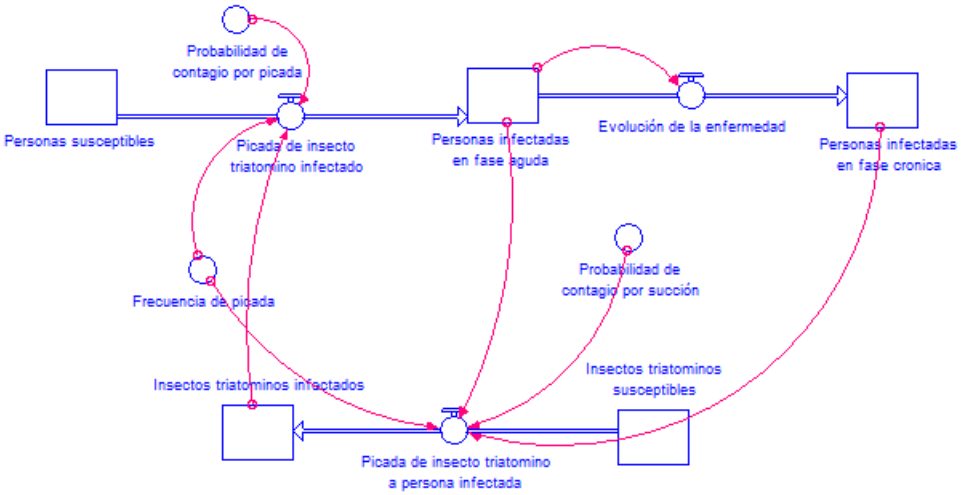


Gráfica 3: Representación en iThink del modelo “Vector-Huesped” en su versión más sencilla.

6.2 Paso 2: Discriminar ambos estados de infección en humanos.

Con el fin de representar de la forma más fiel posible el comportamiento de la enfermedad de Chagas, es importante dividir en compartimento de infectados humanos en fase aguda y fase crónica. Donde la transferencia del estado agudo al estado crónico estará determinado solamente por el paso del tiempo.

Acá es importante notar que al ser ambas fases infecciosas, esto implica que para el insecto triatomino es indiferente en qué fase de la enfermedad se encuentre la persona al momento de succionar su sangre. Por consiguiente la tasa de infección de los triatominos dependerá de la la cantidad total de enfermos que haya en cada momento.



Gráfica 4: Representación en iThink del modelo "Vector-Huesped" discriminando ambas fases de la enfermedad de Chagas.

6.3 Paso 3: Agregar dinámicas poblacionales.

En este punto hace falta incluir las tasas de nacimiento y muerte de los sujetos estudiados en el modelo.

Para comenzar, se conoce que la infección afecta la tasa de muerte de los humanos, más no de los insectos (Kribs-Zaleta & Mubayi, 2012). Más aún, la tasa de muerte en la fase aguda difiere de la tasa de muerte de la fase crónica[1].

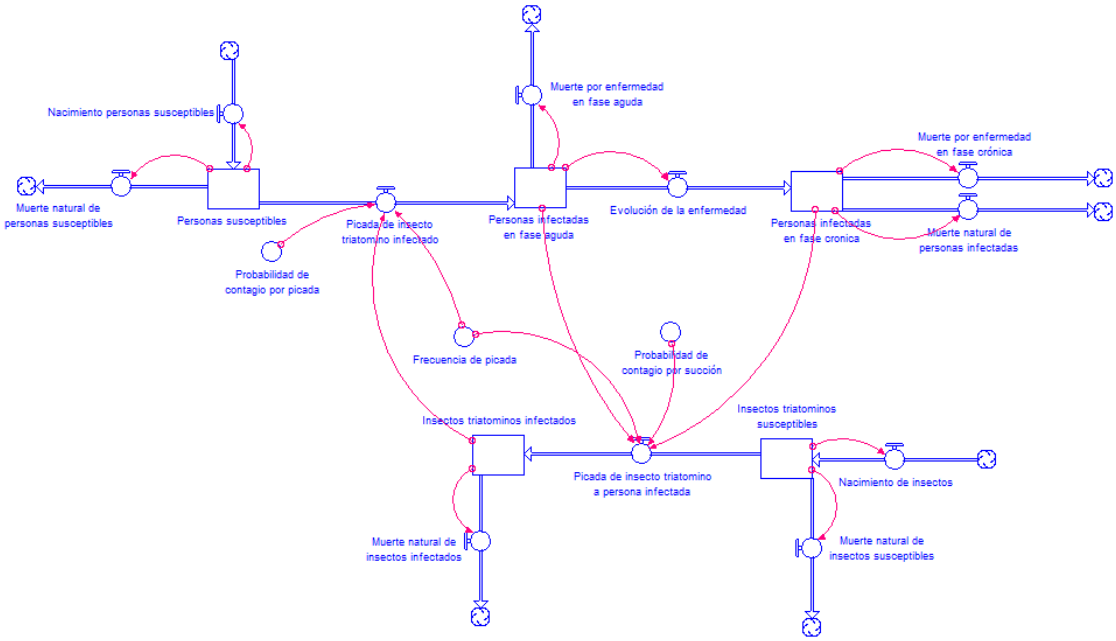
Ahora bien, para incluir las tasas naturales de nacimiento y muerte en este modelo se debe tomar en consideración lo siguiente: si estas tasas se asumen proporcionales al tamaño de la población, como intuitivamente debería ser, entonces el tamaño total de la población crecería de manera exponencial o moriría de manera exponencial, dependiendo de cuál de las dos tasas sea mayor. Como dentro de las preguntas que se está buscando responder es qué tanto la enfermedad puede moldear el tamaño poblacional, este tipo de acercamiento no sería efectivo para dar respuesta a esta investigación. Por lo tanto, se necesita un modelo que no ignore las dinámicas poblacionales, al mismo tiempo que describa un tamaño poblacional constante cuando se tome la población aislada del sistema. En otras palabras, se asumen tasas iguales de nacimiento y muerte para que en ausencia de la enfermedad el tamaño poblacional no cambie (Brauer & Castillo-Chavez, 2010, p. 415).

Adicionalmente, hay que tener en cuenta que los insectos triatominos infectados no tienen crías infectadas (Kribs-Zaleta & Mubayi, 2012). Sin embargo, dentro de la población humana se da el nacimiento de niños

[1] Se mostrará en el próximo capítulo.

infectados porque su madre porta la enfermedad de Chagas[2]. Se quiere saber entonces qué tan importante resultaría tratar a las mujeres embarazadas que se encuentran infectadas con la enfermedad de Chagas.

Finalmente, la muerte natural de los habitantes del Casanare no afectará la tasa de salida del compartimento con fase aguda, pues la duración de una persona en este compartimento es muy corta, comparada con la longevidad promedio de un habitante del Casanare[3].



Gráfica 5: Representación en iThink del modelo. Adicionando las dinámicas poblacionales.

6.4 Paso 4: Agregar comportamientos adicionales que se quieren estudiar.

El presentado anteriormente es el modelo de la enfermedad de Chagas sin estudiar las implicaciones que tienen las políticas de control. Por lo tanto, el paso final consiste en adicionar las interacciones que puedan arrojar una luz hacia qué estrategias de control pueden ser las de mayor impacto.

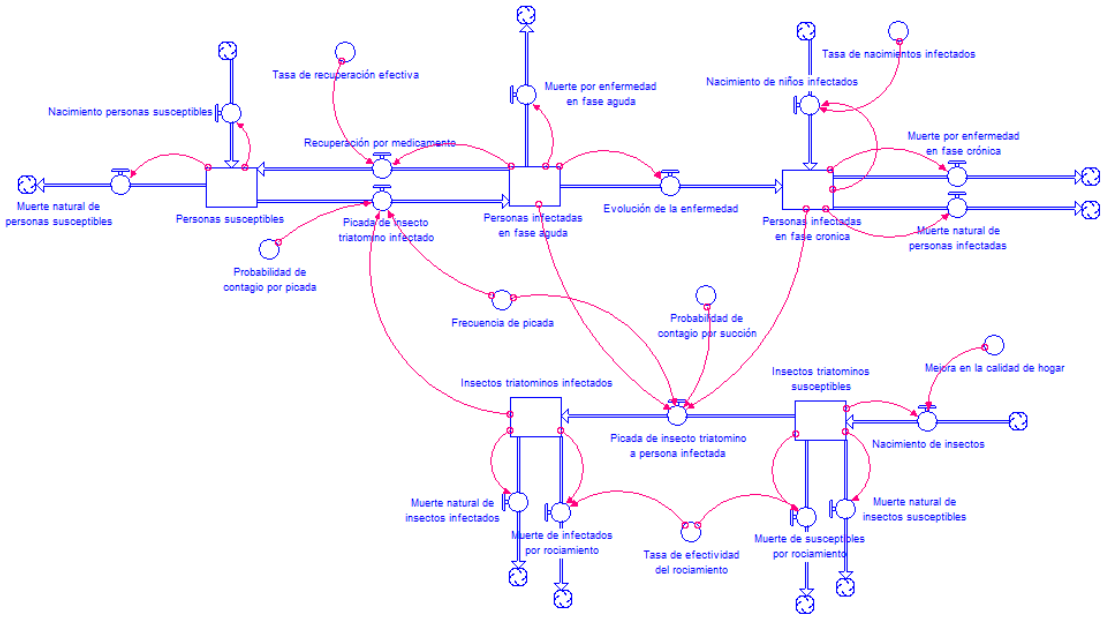
En el compartimento de los humanos, se quiere entender qué tan deseable podría llegar a ser tener una forma médica de atacar la enfermedad. Por propiedades que se explicarán en el próximo capítulo, dicho medicamento está más cerca a desarrollarse para tratar la fase aguda de la enfermedad. Sin embargo, la persona no conseguiría una inmunidad a la enfermedad. En otras palabras, al ser tratada, volvería a la población susceptible.

---

[2] Ibid.

[3] Ibid.

Pasando a la población de insectos triatominos, se quiere estudiar dos políticas: el rociamiento y la mejora de la calidad de vivienda. La primera afecta la tasa de muerte de estos, mientras que la segunda afecta la tasa de nacimiento de los triatominos susceptibles.



Gráfica 6: Representación en iThink del modelo final para la enfermedad de Chagas en el Casanare, Colombia.

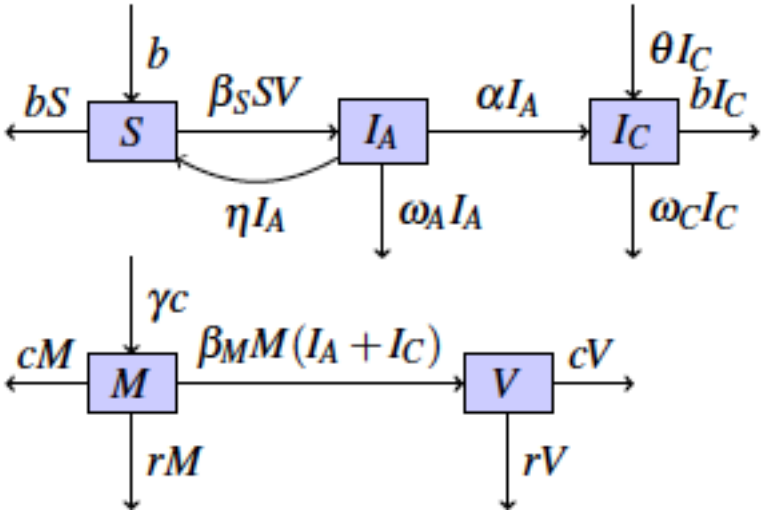
6.5 Modelo Matemático para la enfermedad de Chagas.

Para finalizar, se presenta el mismo modelo que se presentó en la sección anterior, pero esta vez es la versión matemática del mismo. Si se toman los nombres de las variables que se presentan en la tabla 2, el modelo es el presentado en la gráfica 7.

Variable	Nombre
S	Humano susceptible.
I_A	Humano infectado en fase aguda.
I_C	Humano infectado en fase crónica.
M	Insecto triatomino susceptible.
V	Insecto triatomino infectado.
b	Nacimiento-muerte natural de personas.
β_S	Probabilidad de infección de vector a humano.
β_M	Probabilidad de infección de humano a vector.
η	Recuperación por medicamento.
α	Transición de fase aguda a fase crónica.
ω_A	Muerte por fase aguda.
ω_C	Muerte por fase crónica.

θ	Transición de madre a hijo humano.
c	Nacimiento-muerte natural del insecto triatomino.
γ	Efecto de la calidad de vivienda sobre el nacimiento de vectores susceptibles.
r	Muerte por rociamiento.

Tabla 2: Nombres de las variables usadas en el modelo matemático para representar la enfermedad de Chagas.



Gráfica 7: Modelo matemático "Vector-Huésped" adaptado a la Enfermedad de Chagas en el Casanare.

7 Variables Relevantes del Problema

Antes de continuar es de suma importancia resaltar que al no encontrarse una cura inmediata a la enfermedad de Chagas, ya sea por medio de medicamentos o a través de vacunas preventivas para los individuos susceptibles, la herramienta más provechosa que se posee para la lucha de esta enfermedad es buscar reducir lo máximo posible la frecuencia de interacción que se puede presentar entre los vectores transmisores y los humanos. Para este propósito las formas viables que han sido estudiadas y evaluadas actualmente consisten principalmente en (Guhl, Enfermedad de Chagas, 2007):

1. Uso de insecticidas para matar a los triatominos domiciliados.

2. Mejoramiento de la vivienda rural a fin que resulte más difícil de colonizar por los vectores transmisores.

A continuación se presentarán las variables que se utilizaron para la construcción del modelo que busca abstraer la realidad para representar el

comportamiento de la enfermedad de Chagas en el departamento de Casanare, Colombia.

7.1 Población del Casanare

La variable más importante a estudiar es la capacidad de infección que tiene la enfermedad sobre la población del Casanare. Una manera de medir esta capacidad es contando la cantidad de personas infectadas que se encuentran en fase aguda en un momento dado. Esto pues las personas se encuentran en fase aguda por un intervalo de tiempo no mayor a las 8 semanas, aunque el 15% de los infectados pueden morir durante esta semana. (Moncayo & Silveira, 2009). En contraste con los casi 20 años que puede tardar la misma persona en fase crónica (2009). En otras palabras, la cantidad de persona en fase aguda determina que la enfermedad prevalece en la región y ayuda a dar una dimensión de qué tan fuerte es.

Por lo tanto, estudiar cómo varía el comportamiento de esta variable al implementar distintas políticas de acción brinda una intuición de qué métodos de prevención pueden ser los más efectivos para combatir la infección de la población. La información que se va a utilizar para modelar el comportamiento de la población del Casanare se encuentra en la tabla 3.

Para comenzar, se asume que la población susceptible inicial es la totalidad de los habitantes en el departamento del Casanare. Puesto que, para hallar el número básico de reproducción, se asume que la población se encuentra completamente libre de la enfermedad al iniciar el ejercicio. No obstante, al realizar esta aproximación, se asume que la enfermedad se distribuiría homogéneamente en todo el departamento, independientemente de ser zona rural o urbana. El hecho que en Yopal – capital del Casanare – se presenten casos de infectados con esta enfermedad (Secretaría de Salud Departamental de Casanare, 2013) permite realizar esta suposición.

Continuando, la estimación de la esperanza de vida al nacer de una persona en el Casanare se aproximó a partir del informe presentado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia (DANE) sobre la población del Casanare. En este informe se muestra la variación de la edad promedio de muerte que tenían los habitantes durante los distintos años del estudio. Se tomó un promedio de estos datos que resulta en 68 años de vida. Entonces una persona del Casanare vive en promedio 68 años, esto se traduce a que cada año mueren 0.014 personas. Además, al manejar una población constante, esta también será la tasa de nacimientos por año.

La transmisión vertical de madre a hijo de la infección afecta aproximadamente al 8% de los niños nacidos con madres infectadas por el *T. cruzi* (Panamerican Health Organization, 2010). Este niño nacería en una fase asintomática, es decir, directamente en la fase crónica (World Health Organization, 2002, p. 60).

Para realizar los cálculos necesarios, se precisa de información en la fase crónica de la enfermedad. Dentro de esta fase el parásito tarda alrededor de 15 años para atacar el sistema cardiaco, entre otros (Moncayo & Silveira, 2009). Cumplido este tiempo, existe un 35% de probabilidad que la enfermedad mate a la persona (2009).

CONSTANTE	VALOR	REFERENCIAS
Población Inicial Susceptible	157,649 habitantes	(Secretaría de Salud Departamental de Casanare, 2013)
Tasa Picada Vector	36.5 picadas/año	(Rabinovich & Himschoot, 1990)
Probabilidad de Infección por Picada	10^{-3}	(Cordovez, Rendon, Gonzalez, & Guhl, 2014)
Probabilidad Nacimiento Infectado	8%	(Instituto Nacional de Salud, 2012)
Tasa Nacimiento-Muerte	0.014 personas/año	(DANE, 2009)
Probabilidad de Muerte en Fase Aguda	15%	(Guhl, Estado actual, 1999)
Tiempo Estimado Duración Fase Aguda	0.167 años	(Moncayo & Silveira, 2009)
Detección de la Enfermedad en Fase Aguda	2%	(WHO, pg 3)
Probabilidad de Muerte Fase Crónica	35%	(Moncayo & Silveira, 2009)
Periodo de Incubación para Fase Crónica	15 años	(Moncayo & Silveira, 2009)

Tabla 3: Valores relevantes de la población del Casanare para realizar los cálculos del modelo.

7.2 Insectos triatominos domésticos

Con el fin de poder simplificar el estudio, en este caso se realiza una aproximación al comportamiento de los vectores triatominos estudiando la información de la especie *Rhodinus prolixus.* Se escoge dicha especie por su fuerte presencia en el departamento de Casanare (Guhl, Enfermedad de Chagas, 2000), además de su tendencia a migrar hacia las viviendas desde ambientes silvestres (Cordovez, et. al., 2014). Las variables a incluir relacionadas con estos vectores son la cantidad de vectores susceptibles a la enfermedad de Chagas y la cantidad de vectores infectados. Ambos en zonas domésticas. La información que se recolectó de R*. prolixus* se encuentra resumida en la Tabla 4.

Por un lado, para la tasa de muerte y nacimiento natural de los *R. Prolixus* se tiene que cada individuo vive aproximadamente dos años (Gallego Murillo, 2012). Por otro lado, lograr conocer la cantidad real de triatominos que se

encuentran en el Casanare es una tarea imposible, por lo tanto lo que se hizo fue realizar una estimación de 10 vectores por cada habitante del Casanare (Cordovez, et. al., 2014).

Finalmente, se puede asumir que no existe transmisión vertical – madre a cría – en los vectores y que no hay muerte por enfermedad (Kribs-Zaleta & Mubayi, 2012).

CONSTANTE	VALOR	REFERENCIA
Tasa Picada Vector	36.5 picadas/año	(Rabinovich & Himschoot, 1990)
Probabilidad de Infección por Picada	10^{-2}	(Cordovez, Rendon, Gonzalez, & Guhl, 2014)
Tasa de Nacimiento-Muerte	0.5 vectores/año	(Gallego Murillo, 2012)
Población Inicial Vectores Domésticos Susceptibles	10 vectores/habitante	(Cordovez, Rendon, Gonzalez, & Guhl, 2014)

Tabla 4: Valores relevantes de los insectos triatominos para realizar los cálculos del modelo.

7.3 Calidad del hogar

Una de las estrategias usadas para controlar la población de vectores triatominos domiciliados es mejorar la calidad de la vivienda con el fin de reducir la cantidad de espacios propicios para la reproducción, gestación y refugio de estos insectos. Consecuentemente, estudiando la cantidad de hogares en “buen estado” y en “mal estado” junto a su relación con la población de vectores domiciliados, se puede comprender la efectividad de este mecanismo en el combate a la enfermedad. Posteriormente, si se halla necesario, se pueden proponer estrategias de control mejor adecuadas a la situación del Casanare, Colombia.

En el estudio realizado por Rabinovich y Himschoot (1990) se describen tres tipos de hogares (cuya respectiva capacidad de carga a los triatominos se da en la sección 7.2.). A saber, el hogar Tipo 1 consiste en una vivienda arcaica construida a partir de paredes de barro y techos de palma; el hogar Tipo 2 consiste de paredes de barro también, pero tiene teco de metal; y el hogar Tipo 3 está construido con ladrillos y cemento y tiene techo de metal.

Estos resultados muestran que entre mejor construida se encuentre el hogar, reducirá el tamaño de la población de insectos triatominos que es capaz de sostener. Por ende, en el sistema se verá reducida la tasa de nacimiento de los vectores susceptibles. Es por este motivo que en el modelo se encuentra un factor que influye sobre la tasa de nacimiento. Este factor busca representar el porcentaje de viviendas que se encontrarían en buen estado a lo largo del departamento en un momento dado.

CONSTANTE	VALOR	REFERENCIA
Capacidad Carga por Vivienda	Tipo 1: 300 vectores/casa	(Rabinovich & Himschoot, 1990)
	Tipo 2: 60 vectores/casa	
	Tipo 3: 15 vectores/casa	

Tabla 5: Valores por tipo de vivienda de la capacidad de carga para los insectos triatominos.

7.4 Tratamiento con rociamiento

La otra estrategia que actualmente se aplica para buscar reducir la población de insectos vectores en los hogares es el rociamiento de las viviendas con insecticidas. La implementación de este método se debe principalmente a una eficacia en matar el 99% de la población de triatominos que habitan un hogar (Spagnuolo, Shillor, & Stryker, 2011).

El problema radica en que la enfermedad es endémica. Esto ocasiona que en aproximadamente 4 meses después del rociamiento la vivienda vuelva a las condiciones que tenía previamente. Razón por la cual, en estados de emergencia – es decir, localidades que presentan más de 5% de la población infectada – el Ministerio de Salud propone realizar un rociamiento a todas las viviendas cada 4 meses por una extensión de 2 años (Ministerio de Salud, 2012).

Lo ideal para este estudio sería representar el rociamiento de viviendas como una actividad que se realiza reiterativamente después de cierto intervalo de tiempo dado. Pero la complejidad esta aproximación sale de los objetivos de este proyecto. Por lo tanto, la tasa de muerte por rociamiento se aproximará como un factor que afecta de manera constante a la muerte de los triatominos durante un año. Si se asume que el rociamiento se realiza cada cuatro meses, este acercamiento tiene sentido si se piensa como el porcentaje de hogares que está siendo rociado en el Casanare.

CONSTANTE	VALOR	REFERENCIA
Muerte por Rociamiento	99% vectores/vivienda rociada	(Spagnuolo, Shillor, & Stryker, 2011)

Tabla 6: Efectividad de los insecticidas sobre la muerte de insectos triatominos.

7.5 Tratamiento médico

El primer problema de buscar un tratamiento médico para la enfermedad de Chagas es el hecho de ser una “enfermedad silenciosa”, en el sentido que escasean los síntomas clínicos de esta (Panamerican Health Organization, 2010). Resultando muy difícil de diagnosticar.

Actualmente se busca tratar la enfermedad con dos medicamentos: Benznidazol y Nifurtimox, cuyo propósito es eliminar el *T. cruzi* del cuerpo, mas no inmunizar a la persona (Rosas, Guhl, & Luquetti, Tratamiento etiológico de la enfermedad de Chagas, 2007, p. 138). Más aún, este tratamiento acarrea varias complicaciones. La primera de esta es que tiene muchos efectos colaterales – que no dependen de la dosis diaria – entre estos se encuentran: "inapetencia, náuseas, vómitos, pérdida de peso, trastornos de sueño y comportamiento, leucopenia, trombocitopenia, polineuropatía y reacciones cutáneas de hipersensibilidad" (2007, p. 140). La segunda complicación es que solamente puede ser efectiva durante la fase aguda de la enfermedad, donde aun cuando se realiza un tratamiento adecuado y completo, no asegura la eliminación total del parásito (Luquetti & Rassi, 2007, p. 147). La última es su producción discontinua y sin interés económico por la industria farmacéutica debido a su bajo uso para tratar la enfermedad de Chagas y su ineficacia para tratar otras enfermedades (2007, p. 143).

Adicionalmente, así la persona sea curada de la fase aguda, no será inmune a la enfermedad. Es decir que volverá a la población susceptible del sistema (2007, p. 147). A esto se le suma el hecho que solamente en un 2% de las ocasiones la enfermedad es diagnosticada correctamente en su fase aguda, debido a sus síntomas similares a las de una gripe común (World Health Organization, 2002).

Por estas razones es que la inclusión de un tratamiento médico en el modelo es puramente académico. Lo que se busca es entender qué tan importante puede llegar a ser tener dicha cura, con el fin de aumentar los incentivos financieros para invertir en la investigación y desarrollo de esta droga (Panamerican Health Organization, 2010).

8 Resultados

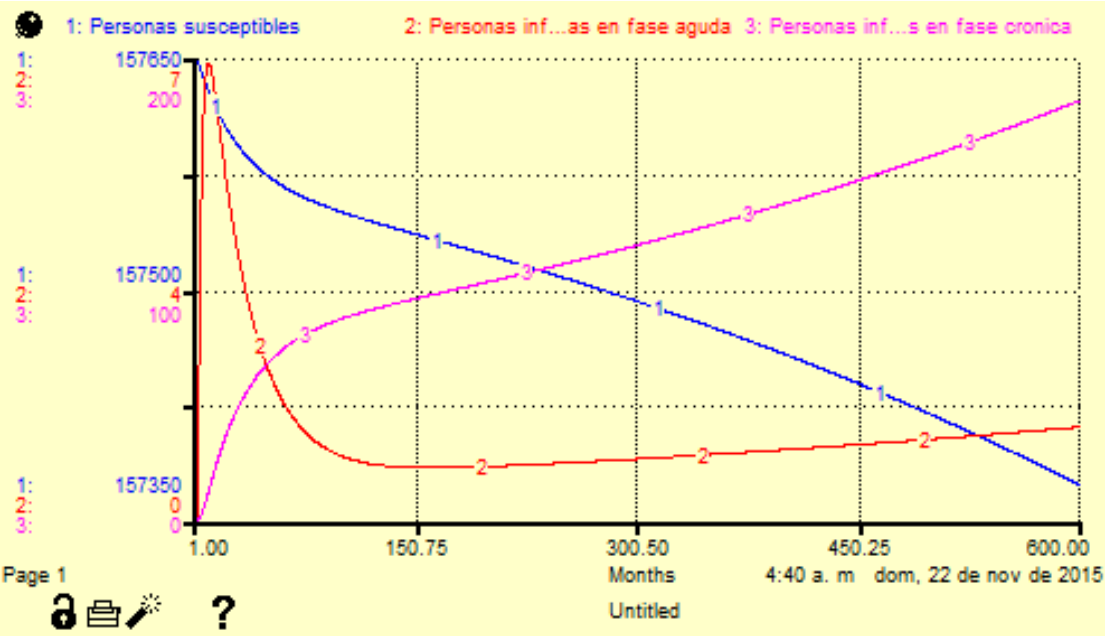
Ya conociendo los valores que son relevantes para el sistema y la manera en que se van a utilizar, se procede a correr el modelo desarrollado en iThink. Antes de continuar, recuerde que se está asumiendo que la totalidad de personas y de vectores son susceptibles al comienzo, entonces ¿cómo lograr que el modelo presente resultados? Recuerde también que se está buscando entender qué comportamiento tendrá esta población en su totalidad susceptible si se introduce un individuo infectado. Acá se encuentra la clave.

Un primer acercamiento para comprender las dinámicas de esta enfermedad se puede realizar asumiendo una cantidad inicial de infectados (ya sea de huéspedes o vectores) que sea suficiente para crear el ambiente capaz de responder a las distintas políticas de control que se quieren estudiar.

Ahora bien, primero se intentó asumiendo que el infectado se encontraba en fase aguda; luego, que el infectado llegaba directamente desde la fase crónica. En ambos casos se obtuvieron comportamientos muy interesantes. El problema

fue que las poblaciones de insectos infectados no alcanzaban a crecer lo suficiente como para soportar las políticas de cambio que se aplicarían más tarde. Para esto se necesitaba dejar el simulador corriendo mucho más tiempo.

Por lo tanto, se optó por incluir los nuevos infectados en la población de insectos, dejando la población de humanos infectados en cero. Lo importante en este caso es el orden de magnitud. Como la totalidad de insectos susceptibles al comienzo se asume 1,576,490, un solo triatomino infectado no hace la diferencia, por eso se introdujeron 1000 vectores infectados en el tiempo cero. Los resultados se presentan en la gráfica 8. Las fórmulas y relaciones que se dieron al modelo de iThink se pueden encontrar en el Apéndice A.



Gráfica 8: Comportamiento de las personas susceptibles, en fase aguda y en fase crónica en el modelo de la enfermedad de Chagas sin aplicar políticas de control.

En el comportamiento presentado se puede observar cómo estos 1000 vectores infectados introducidos en el sistema crean un pulso que da pie a las condiciones iniciales del problema. Por esto, se debería analizar el comportamiento que se obtiene después de este pulso.

Observe que el comportamiento exponencial de las tres poblaciones (de crecimiento acelerado para los infectados, y de decrecimiento acelerado para los susceptibles) sugiere que la interacción entre los triatominos y las personas crean ciclos de refuerzo. Donde los ciclos de refuerzo se entienden por estructuras dentro del sistema que refuerzan o amplifican un comportamiento (Sterman, 2000, p. 12). En las poblaciones infectadas se da porque el aumento de personas enfermas, incrementa las probabilidades de un triatomino de infectarse, creciendo así la cantidad de insectos infectados que a su vez infectan a más persona. Por el lado de la población susceptible, esta disminuye porque se infecta – tenga presente que si las personas no se enfermaran, la

población se mantendría constante –, lo que aumenta la cantidad de personas enfermas, aumentando los vectores infectados y picando así a más personas susceptibles, disminuyendo entonces su población.

Con el panorama que se dibuja con este primer acercamiento, la pregunta natural para hacerse es ¿qué tanto puede llegar a crecer esta población de infectados? Para poder dar respuesta a esta pregunta se realizará a continuación el desarrollo matemático para poder comprender con mayor profundidad el comportamiento de este sistema.

8.1 La Matriz de la Próxima Generación

La *matriz de la próxima generación* es la herramienta para encontrar el número básico de reproducción (se denotará como R_0 en adelante). La forma de interpretar la matriz es la siguiente: para una entrada en la fila *i* con columna *j* se entiende que este valor será la cantidad de nuevos infectados que aparecerán en el compartimento *i* a causa de individuos infectados del compartimento *j* (Brauer & Castillo-Chavez, 2010, p. 394). Es decir, un individuo infectado del compartimento *j* creará un flujo de nuevos infectados que entrarán al compartimento *i* con cierta tasa; dicha tasa es el valor de la entrada (i,j).

Con esto en mente, para construir la matriz solamente se necesitan los compartimentos que contienen sujetos infectados y que pueden recibir nuevos infectados (Brauer & Castillo-Chavez, 2010, p. 394). Luego de restringirse a estos casos, se debe identificar las tasas a las cuales nuevos infectados – ya sea vectores o huéspedes – aparecen como consecuencia de la interacción del sistema. Dichas tasas marcan las rutas a través de las cuales se comunican los diferentes compartimentos; entonces difieren entre sí por ser el resultado de la ecología que define estas interacciones (Cordovez, et. al., 2014).

Más aún, se debe pensar que al momento de crear la matriz toda la población es susceptible y solamente se va a introducir un individuo infectado. Por esta razón, los valores de la población de personas susceptibles (S_0) e insectos triatominos (M_0) se asumen en un estado hipotético inicial en el cual no existía la enfermedad.

La aproximación matemática para calcular la matriz de la próxima generación se encuentra en el Apéndice B. A continuación se construirá la matriz a partir de la comprensión de las interacciones dentro del sistema modelado.

Para comenzar, se debe tomar un orden para los compartimentos de sujetos infectados. El orden que se dé no afectará el resultado final, por lo tanto el orden escogido es: (1) personas infectadas en fase aguda (I_A); (2) personas infectadas en fase crónica (I_C); por último, (3) insectos triatominos infectados (V). En este orden de ideas, se descarta primero las entradas de la matriz que serán cero pues no existe interacción entre compartimentos. Estas serían: la entrada (1,1) representa la cantidad de nuevos infectados en fase aguda que

se dan por individuos que ya se encuentran en fase aguda, pero esta relación no existe; así como tampoco existe la relación de la entrada (1,2) pues una vez una persona se encuentre en fase crónica, no puede volver a la fase aguda. De igual manera, después de una picada no existe la posibilidad de llegar directamente a la fase crónica sin pasar por la fase aguda, por lo tanto la entrada (2,3) también es cero. Finalmente, al no considerarse transmisión de la enfermedad entre los vectores, la entrada (3,3) es cero.

Pasando ahora a las entradas no nulas, se comienza por la infección a humanos por parte de vectores. Se ha explicado que cuando una persona se contagia por una picada, automáticamente se encuentra en la fase aguda, por tal motivo la entradas (1,3) no es nula. Esta entrada indicará el promedio de personas infectadas en fase aguda que se dan por las picadas de un solo insecto triatomino infectado. Este valor se encuentra determinado por la cantidad de encuentros – succión de sangre – que tenga dicho vector con las personas. Pero dicho encuentro se hace efectivo bajo la probabilidad que el parásito del *T. Cruzi* sea transmitido en la picada. Esta tasa efectiva de picada es β_S. Sin embargo, el insecto solamente podrá picar las personas mientras no haya muerto por rociamiento (r) o muerte natural (c), esto es $\beta_S/r+c$ picadas por periodo de tiempo. Por último, tienen la posibilidad de picar una población S_0 de humanos susceptibles. Entonces la entrada (1,3) será $\left(\frac{\beta_S}{r+c}\right)\cdot S_0$.

Continuando con las personas infectadas en fase crónica, hay dos maneras de que nuevos infectados lleguen a este compartimento: pasando de una fase aguda o por nacimiento de una madre infectada. Esta última estaría en la entrada (2,2) donde la tasa de nacimiento de niños infectados es θ, a menos que la madre haya muerto ya sea naturalmente (*b*) o por la enfermedad (ω_C), resultando en una tasa de θ/ω_C+b. La opción faltante se da por una transferencia de fase aguda a fase crónica que dicta el tiempo que se encontraría en la entrada (2,1) y tiene un promedio α. De nuevo, esta transferencia se da si el individuo no ha salido ya del compartimento de fase aguda por otros medios, ya sea por muerte de la enfermedad (ω_A), por sanación (η) o porque ya no se encuentra en fase aguda (α), obteniendo entonces una tasa de $\alpha/\omega_A+\eta+\alpha$.

Finalmente, los insectos triatominos se pueden infectar al alimentarse de un humano infectado, ya sea que se encuentre en fase aguda o fase crónica, dándole así valores no nulos a las entradas (3,1) y (3,2). Ambas muy similares. Primero, una persona infectada será picada con cierta frecuencia y en cada picada, el insecto tendrá cierta probabilidad de adquirir el parásito del *T. Cruzi*. Esta picada efectiva de contagio está dada por β_M. Además, la población total de vectores susceptibles (M_0) tiene potencialmente la misma probabilidad de alimentarse de la misma persona. Ahora bien, el triatomino solamente se podrá alimentar de esta persona mientras se encuentre viva o infectada, resultando en las tasas de transferencia $\left(\frac{\beta_M}{\omega_A+\eta+\alpha}\right)*M_0$ y $\left(\frac{\beta_M}{\omega_C+b}\right)*M_0$.

Ahora se presenta la matriz de la próxima generación junto con los valores que se acaban de calcular.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{\beta_S S_0}{r+c} \\ \frac{\alpha}{\omega_A+\eta+\alpha} & \frac{\theta}{\omega_C+b} & 0 \\ \frac{\beta_M M_0}{\omega_A+\eta+\alpha} & \frac{\beta_M M_0}{\omega_C+b} & 0 \end{pmatrix}$$

Como ya se explicó anteriormente, esta matriz de la próxima generación guarda solamente aquellas tasas de transferencia que influyen sobre la propagación de la enfermedad de generación en generación. Siendo así, es relevante notar que en esta matriz no se toma el efecto de la mejora en la calidad de la vivienda (γ) como un factor relevante para la propagación de la enfermedad. Esto sucede esencialmente porque a la dinámica de la enfermedad le es indiferente los flujos de entrada a los compartimentos susceptibles. Sin embargo, observe que sí es determinante la cantidad de vectores susceptibles iniciales (M_0) que se encuentran al momento de introducir los agentes infectados. Esto se puede entender de la siguiente manera: si la población ya se encuentra infectada, cambiar la calidad de la vivienda no frena el crecimiento de la enfermedad; pero si existe un entorno con una población inicial baja de vectores susceptibles, se puede evitar que la enfermedad se desarrolle como endémica a la región.

Este resultado refuerza el concepto de la enfermedad de Chagas como una enfermedad de pobreza, más aún en el contexto del Casanare. Pues acá se vive próximo a las plantaciones palma africana, que es el hábitat natural de los *R. Prolixus*, dificultando así el control sobre la cantidad inicial de vectores susceptibles que habiten la zona.

8.2 Virulencia y Número Básico de Reproducción

El paso a seguir para calcular el número básico de reproducción debería ser el de calcular el valor propio más grande de la matriz de la próxima generación (Cordovez, et. al., 2014). Sin embargo, para esta matriz particular, hallar sus valores propios resulta bastante engorroso. Por ende, se opta por calcular una aproximación que sigue siendo valiosa para el estudio en tanto a la información que puede brindar, además de definir el comportamiento del número básico de reproducción.

Dicha aproximación recibe el nombre de *virulencia* (*H*), que además de dominar el comportamiento del número básico de reproducción (R_0), permite a su vez enfocar el estudio de las dinámicas de la enfermedad a aquel ciclo que posea la mayor influencia sobre R_0 (Amaya, 2014). El cálculo exacto de este valor se encuentra en el Apéndice C.

$$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{max}\left\{\frac{\boldsymbol{\theta}}{\boldsymbol{\omega_c + b}}, \sqrt{\frac{\boldsymbol{\beta_M}}{\boldsymbol{\omega_A + \eta + \alpha}} * \frac{\boldsymbol{\beta_S}}{\boldsymbol{r + c}}}, \sqrt[3]{\frac{\boldsymbol{\beta_M}}{\boldsymbol{\omega_C + b}} * \frac{\boldsymbol{\beta_S}}{\boldsymbol{r + c}} * \frac{\boldsymbol{\alpha}}{\boldsymbol{\omega_A + \eta + \alpha}}}\right\}$$

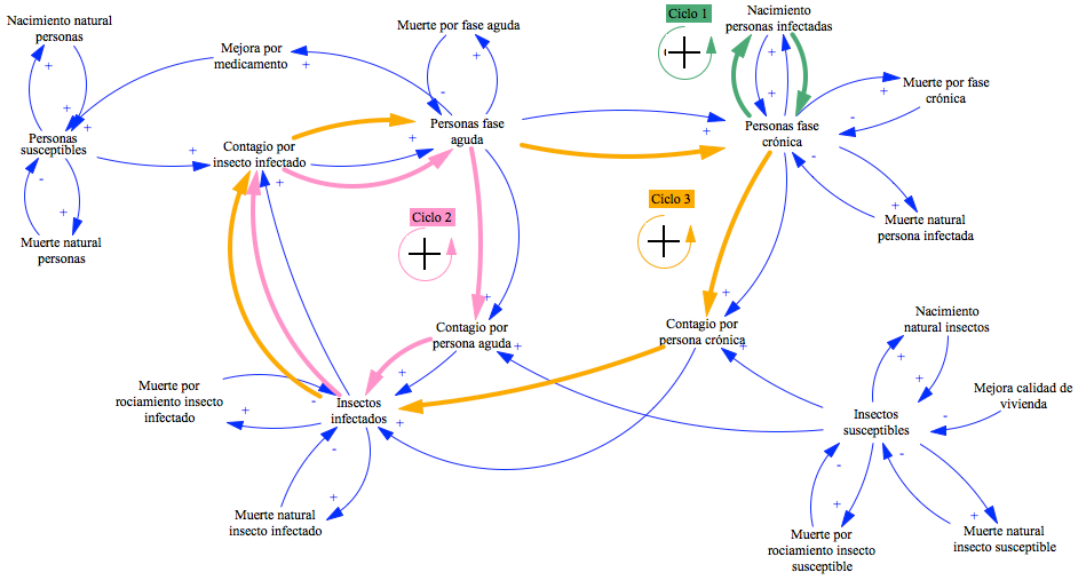
Estos tres valores que considera la virulencia se pueden interpretar como la capacidad que tiene cada infectado de producir un nuevo infectado dentro de su compartimento.

Si se nombra ciclo 1 a $\theta/\omega_c + b$, este está indicando que una persona infectada en fase crónica puede crear un nuevo infectado en fase crónica de forma directa, con dicha tasa. Sabiendo que esta tasa incluye la probabilidad de la persona de quedar embarazada y de transmitir la enfermedad de forma congénita.

En este mismo orden de ideas, el ciclo 2 es dado por $\sqrt{(\beta_M/\omega_A + \eta + \alpha)(\beta_S/r + c)}$. Para entender este resultado, imagine que comienza con una persona enferma en fase aguda, se sabe que esta persona puede infectar a los vectores susceptibles a una tasa de $(\beta_M/\omega_A + \eta + \alpha)$. Ahora el triatomino se encuentra infectado, transmitiendo el parásito a una tasa de $(\beta_S/r + c)$. Por lo tanto, cuando este insecto logre una picada efectiva se tendrá una nueva persona enferma en fase aguda. Como se observa, se necesitan dos pasos para que un individuo en fase aguda convierta a un individuo susceptible a infectado en fase aguda, por esto la raíz es cuadrada (son dos pasos) (van den Driessche & Watmough, 2002).

De manera muy similar, se puede interpretar el ciclo 3 dado por $\sqrt[3]{(\beta_M/\omega_C + b)(\beta_S/r + c)(\alpha/\omega_A + \eta + \alpha)}$ como los pasos que toma una persona enferma en fase crónica para generar un nuevo infectado en fase crónica. Si se empieza por un individuo en fase crónica, este puede infectar a un vector $\left(\frac{\boldsymbol{\beta_M}}{\boldsymbol{\omega_C + b}}\right)$ que a su vez infecta a una persona susceptible $\left(\frac{\boldsymbol{\beta_S}}{\boldsymbol{r + c}}\right)$**.** La diferencia en este caso es que se necesita un paso adicional, pues cuando el individuo es infectado, este entra a fase aguda y debe seguir a la fase crónica para "cerrar" el ciclo, lo cual hace a una tasa de $(\alpha/\omega_A + \eta + \alpha)$. Este tercer paso es la razón por la que se obtiene una raíz cúbica.

Una representación gráfica de los ciclos que se acaban de describir se encuentra a continuación.



Gráfica 9: Representación gráfica por ciclos causales de los ciclos de la virulencia.

En resumen, las tres opciones para la virulencia (*H*) indican que el peso en la epidemia de lo disputan los tres ciclos que se pueden observar en el gráfico 9: el primero es el ciclo que consiste únicamente del nacimiento de niños infectados debido a una madre infectada; el segundo es el ciclo que se enfoca en la interacción entre los vectores y las personas en fase aguda; finalmente, el tercer ciclo es aquel que describe la interacción entre los triatominos y las personas infectadas en fase crónica.

Ahora lo importante es conocer cuál de estos tres ciclos tendrá el mayor valor, pues – como lo indica la definición de la virulencia – este será el ciclo que domine el comportamiento del número básico de reproducción, de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{H \leq R_0 \leq \frac{1+\sqrt{5}}{2} H.}$$

De esta manera, el valor de H definirá si la enfermedad será endémica ($H > 1$) al Casanare o eventualmente desaparecerá ($\left(1 + \sqrt{5}/2\right)H < 1$).

En el Apéndice C se puede encontrar los cálculos que otorgan al ciclo dos la victoria entre los tres ciclos considerados. Al ser este ciclo el que solamente incluye la interacción entre los triatominos infectados y los enfermos en fase aguda, su victoria está dada por la rapidez que tiene de generar nuevas personas infectadas, comparado con sus contrincantes.

Este resultado sugiere entonces que para tratar la enfermedad es importante enfocarse en crear soluciones y mecanismos de control que se preocupen principalmente por la población enferma que se encuentra en fase aguda. Dentro del modelo propuesto en este trabajo, dichos mecanismos serían el

rociamiento de las viviendas y el desarrollo de un medicamento efectivo.

Adicionalmente, este resultado lleva a pensar otro tipo de soluciones que vale la pena estudiar en futuros trabajos. Por ejemplo, se puede pensar qué implicaciones y resultados se obtendrían si se propone un método de cuarentena para las persona que les detecte la enfermedad en fase aguda. Por supuesto una aproxiamción como esta tendría sus complicaciones, ya sea la logística de crear áreas de cuarentena o el hecho que actualmente detectar la enfermedad a tiempo no es fácil y apenas consiste de un 2% de efectividad (World Health Organization, 2002).

Conociendo el valor de H, se pueden reemplazar las variables con la información expuesta en el capítulo 7. En este cáculo se asume que no se están tomando medidas de control, dando como resultado de $H = 2.89$. Por lo tanto, el valor de R_0 es mayor a 2.89. Lo cual dice que en ausencia de controles a la enfermedad, esta es endémica en el departamento del Casanare. Más aún, una persona infectada está infectado por lo menos 2.89 personas en promedio durante la duración de su enfermedad.

Sabiendo hasta este punto que la mejora en la calidad del hogar no combate la enfermedad, que el medicamento utilizado no es efectivo y que las políticas de rociamiento en el Casanare no han sido implementadas de manera que produzcan resultados, se puede asumir entonces que en este departamento la enfermedad es endémica. Pero la pregunta sigue siendo ¿qué tanto crecerá la población de enfermos?

8.3 Equilibrio endémico

El hecho que se haya podido tomar como referencia la gráfica 8 sin importar el valor inicial de individuos infectados que se haya introducido al sistema, es gracias a la propiedad de *estabilidad* que tiene el modelo. Esta propiedad asegura que no importa si cambia el valor inicial que se dé al sistema, el comportamiento siempre va a tender a la misma solución en el largo plazo (Brauer & Castillo-Chavez, 2010, p. 17).

Este comportamiento en el largo plazo está definido por el valor del número básico de reproducción. Si este es menor a uno, entonces la enfermedad irá desapareciendo paulatinamente hasta llegar a una población libre de enfermedad y estabilizare allí. Por otro lado, si esta cantidad en mayor a uno, entonces la enfermedad será endémica, y en el caso de los modelos vector-huésped, se llegará también a un momento de estabilización, este recibe el nombre de *equilibrio endémico* (2010, p. 413).

Hallar este equilibrio endémico es hallar la respuesta a ¿qué tanto irá a crecer la población de infectados si no se implementan adecuadamente mecanismos de control?

Para el caso de la enfermedad de Chagas modelado en este trabajo, el cálculo del equilibrio endémico se encuentra en el Apéndice D. Los porcentajes de distribución que se da de la población total en este estado estable es la siguiente:

$$S(habitantes\ susceptibles) = 0.042$$
$$I(total\ habitantes\ infectados) = 0.958$$
$$M(triatominos\ susceptibles) = 0.1251$$
$$V\ (triatominos\ infectados) = 0.8749$$

Estos valores son preocupantes pues comunican que cuando el número básico de reproducción sea mayor a uno, la infección no va a parar hasta que la mayoría de la población del Casanare se encuentre infectada, aproximadamente el 96% de esta. Por ende, es imperativo poder encontrar soluciones fáciles de llevar a cabo que sean efectivas al momento de reducir el valor del número básico de reproducción.

9 Alternativas de solución

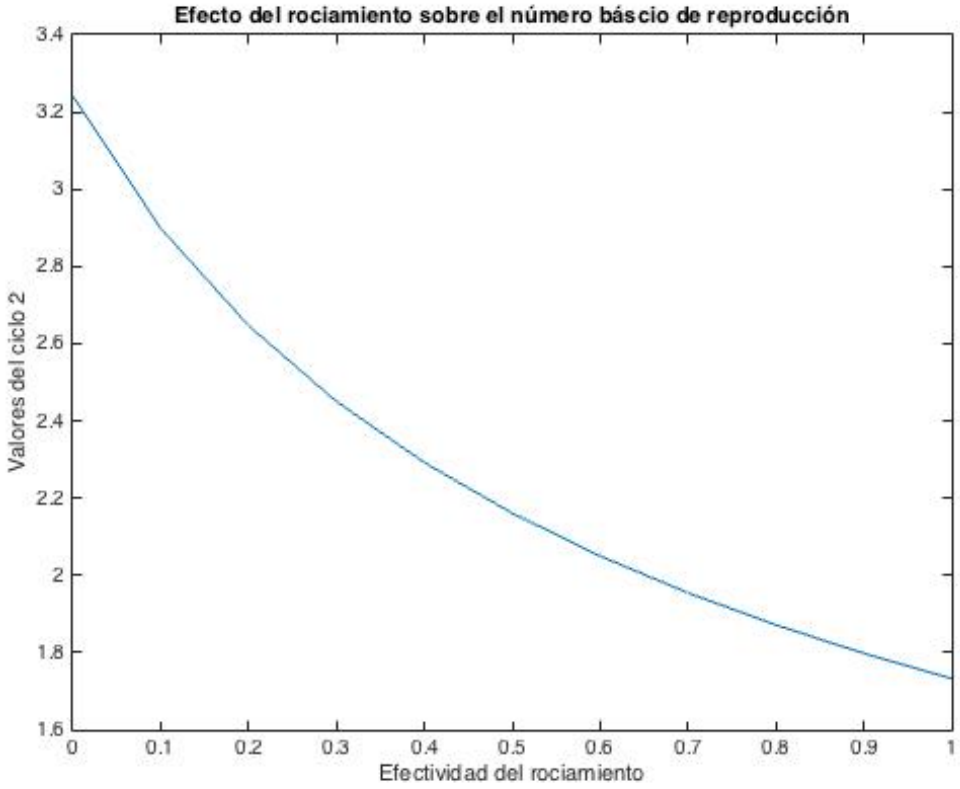
El propósito es ahora estudiar las alternativas de control que pueden cambiar el valor de la virulencia, modificando así el número básico de reproducción. Como lo que se busca es reducir el valor de R_0, se debe estudiar su cota superior, esta es $\frac{1+\sqrt{5}}{2}\ H$.

9.1 Comportamientos de alternativas

9.1.1 Comportamiento al variar la efectividad del rociamiento

Se comienza estudiando el cambio en el comportamiento del número básico de reproducción a partir de políticas cada vez más intensas de rociamiento en el departamento.

Recuerde que para que el rociamiento de las viviendas sea efectivo, se debe realizar periódicamente, con un periodo de cada 4 meses. De lo contrario, la fuerza del insecticida se irá disipando y se volvería al estado inicial. Por consiguiente, los porcentajes de efectividad de rociamiento que se presentan en la gráfica 10 se deben entender como el porcentaje de cubrimiento de las viviendas del Casanare realizando un rociamiento cada 4 meses.

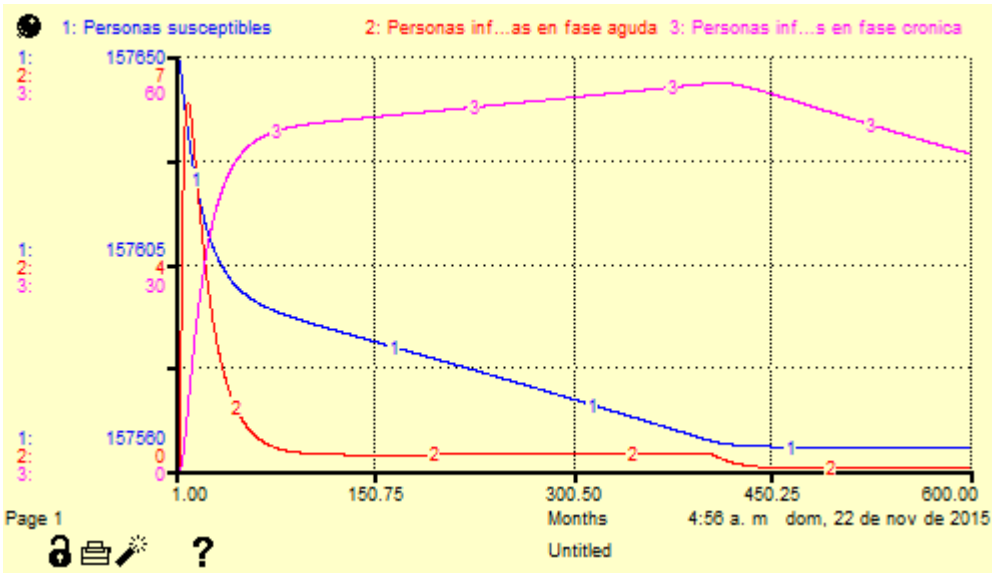


Gráfica 10: Comportamiento de la cota superior de R_0 a medida que se intensifica el uso de insecticida.

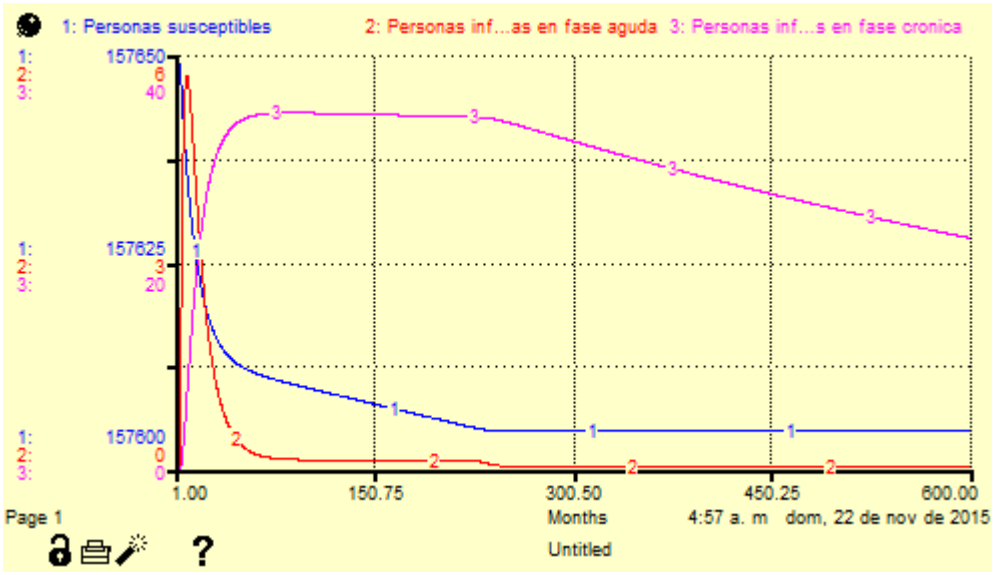
En los resultados se observa que a medida que crece la efectividad del rociamiento, el valor del número básico de reproducción es reducido de manera exponencial. Este comportamiento propone al rociamiento como un candidato fuerte para el control, pues un pequeño aumento en el cubrimiento de viviendas genera una reducción considerable para R_0.

El problema es que esta práctica alcanza un límite a partir del cual no se puede avanzar más. Es decir, en el momento en que se cubra el 100% de los hogares en el departamento, no hay forma de realizar mejoras en el procedimiento, pues el insecticida mata el 99% de los insectos triatominos. Esto es, si el 100% del rociamiento no logra colocar a R_0 por debajo de 1, entonces habría que apoyarse en otras metodologías que se lleven a cabo al mismo tiempo para poder lograr el objetivo.

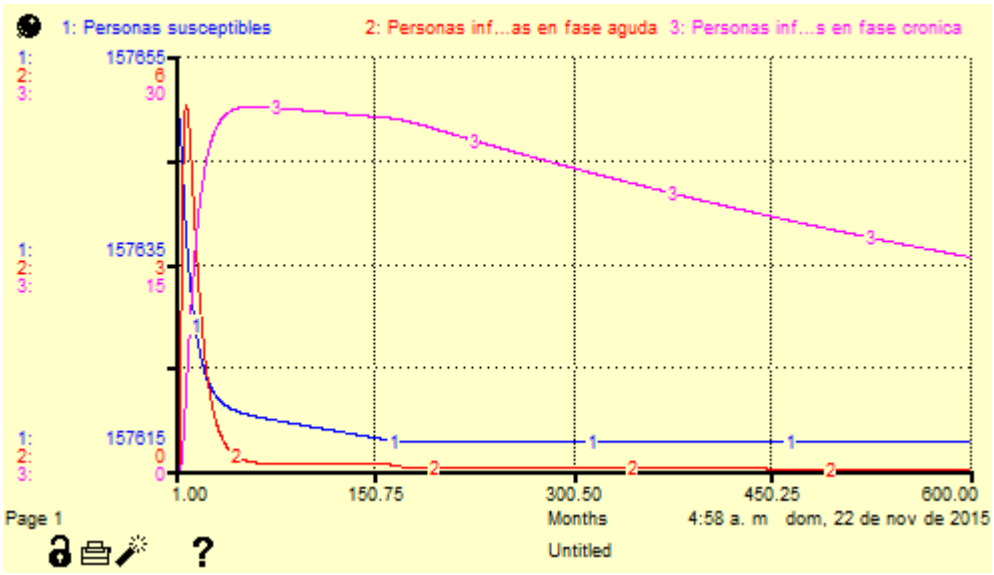
Sin embargo, se crea un rayo de esperanza cuando se analiza el comportamiento del sistema a nivel experimental, como se muestra a continuación.



Gráfica 11: Comportamiento de las poblaciones cuando se aplica un rociamiento con efectividad del 30%.



Gráfica 12: Comportamiento de las poblaciones cuando se aplica un rociamiento con efectividad del 60%.



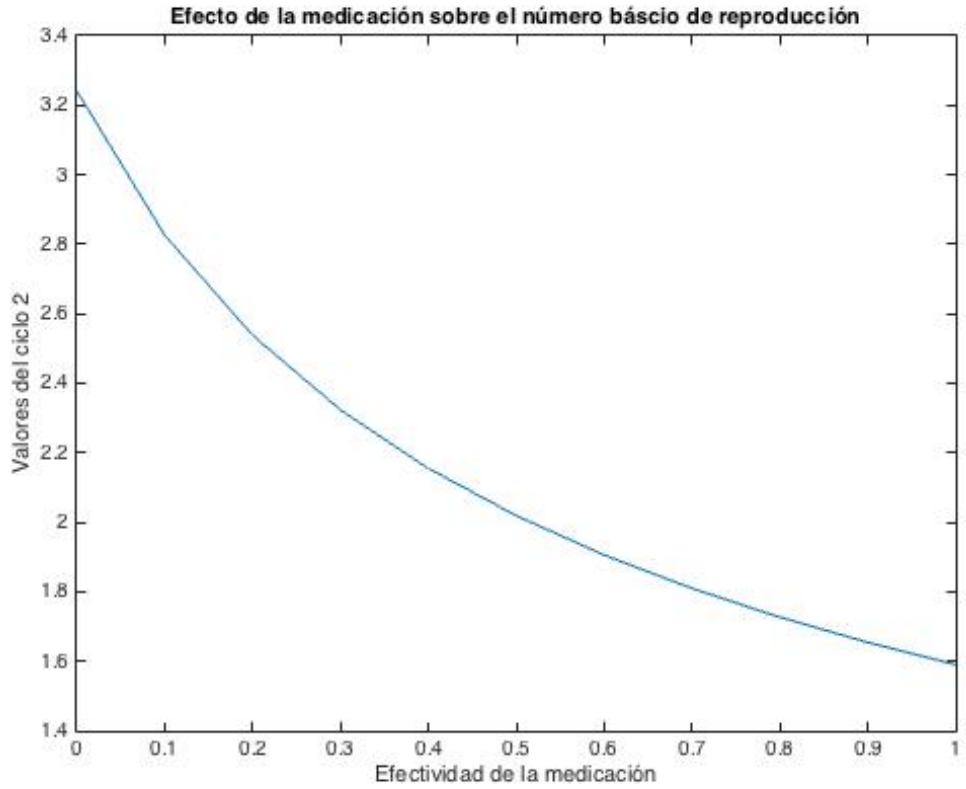
Gráfica 13: Comportamiento de las poblaciones cuando se aplica un rociamiento con efectividad del 90%.

Como se puede apreciar en las gráficas 11, 12 y 13, el comportamiento de los enfermos tanto en fase aguda como en fase crónica cambia hacia una tendencia a la baja. En la cual, a medida que sea más intenso el rociamiento, más prominente será la pendiente. Más aún, se puede observar que existe un punto donde la población de los vectores se hace insostenible y comienza a debilitarse la prevalencia de la enfermedad.

El comportamiento regulado que se presenta en el decrecimiento desacelerado en las poblaciones infectadas se puede explicar mejor a través de ciclos de balance (Sterman, 2000, p. 12). El rociamiento de las viviendas disminuye la población de insectos infectados porcentualmente. Por consiguiente, si mayor es la población de insectos infectados, mayor impacto tendrá el rociamiento de la vivienda, disminuyendo esta población con mayor fuerza. Al afectar entonces a la población de vectores infectados, se ve alterado el comportamiento del ciclo 2 (el ciclo de la fase aguda). Presentando así el comportamiento desacelerado observado en la simulación.

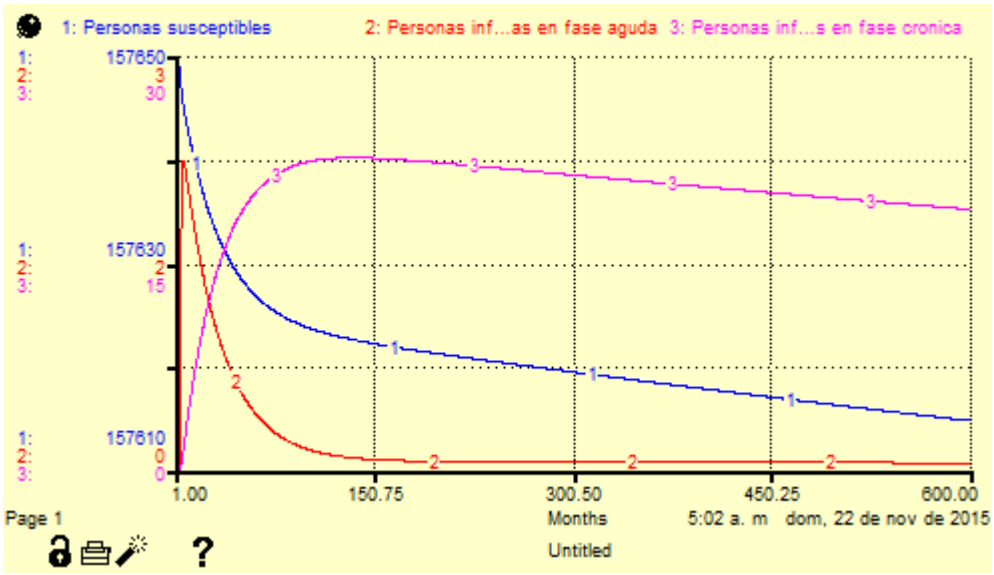
9.1.2 Comportamiento al variar la efectividad de medicamento

La segunda metodología a tratar se basa en el supuesto que se llegue a desarrollar un medicamento capaz de curar efectivamente a las personas enfermas que se encuentren en fase aguda. Al mismo tiempo, se asumiría que la tasa de diagnóstico de la enfermedad es mucho mayor.



Gráfica 14: Comportamiento de la cota superior de R_0 a medida que se mejora la efectividad del método de medicación.

En la gráfica 14 es interesante notar cómo el comportamiento de esta alternativa se asemeja completamente al comportamiento por rociamiento. Esta impresión se ve corroborada por el comportamiento que se obtiene de las poblaciones infectadas cuando se trata con medicamento, como se puede ver en la gráfica 15. Esto lleva a la conclusión que resulta mucho más viable y realista invertir en rociamiento en vez de en investigación y desarrollo del medicamento pues el efecto que estos tendrán sobre el número básico de reproducción es bastante similar.

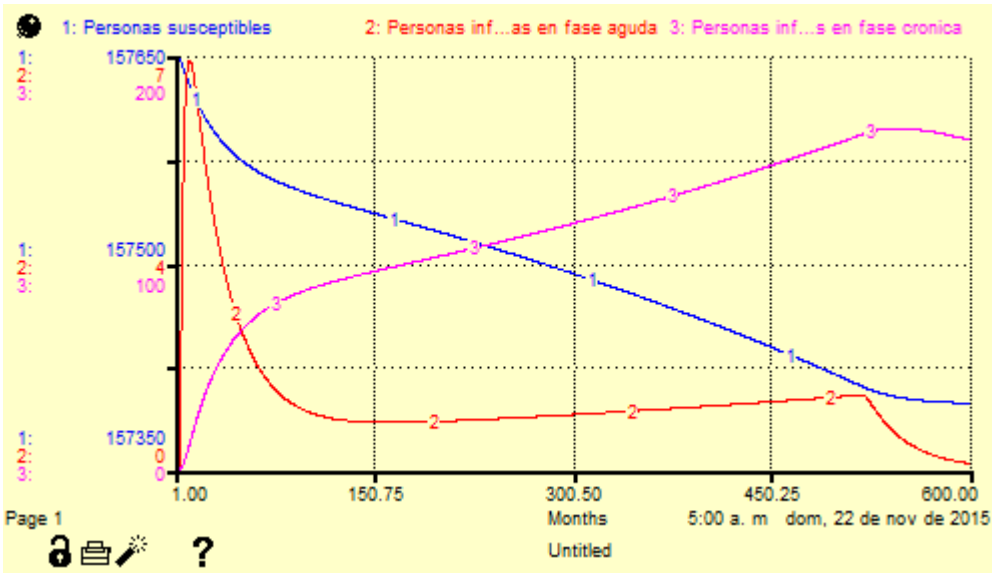


Gráfica 15: Comportamiento de las poblaciones cuando se utiliza medicación con efectividad del 90%.

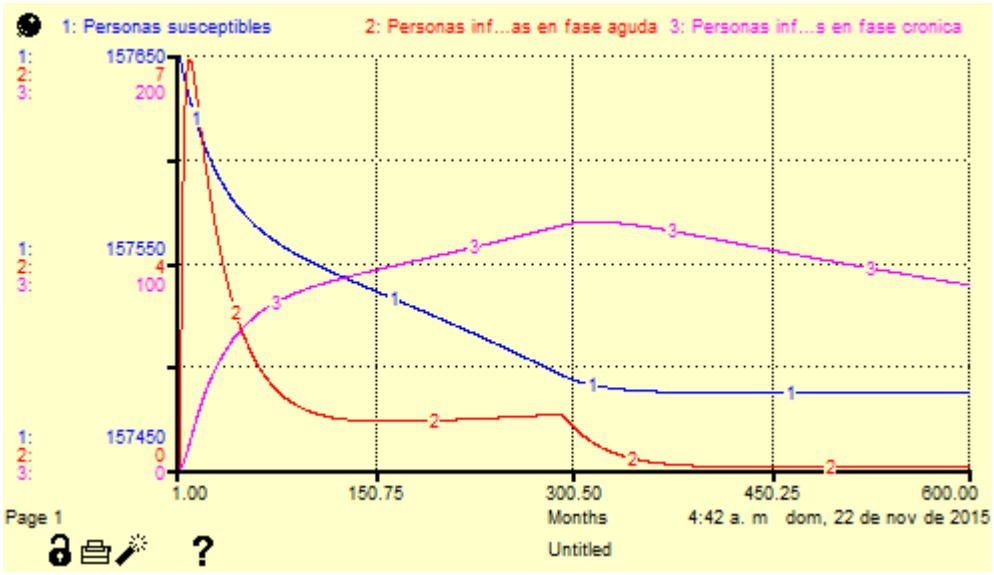
9.1.3 Comportamiento al variar la población inicial de vectores

Uno de los factores que se creía resultaría esencial como mecanismo preventivo a la enfermedad de Chagas en el Casanare era el control de la tasa de nacimiento de los vectores a través del mejoramiento continuo de la calidad de las viviendas.

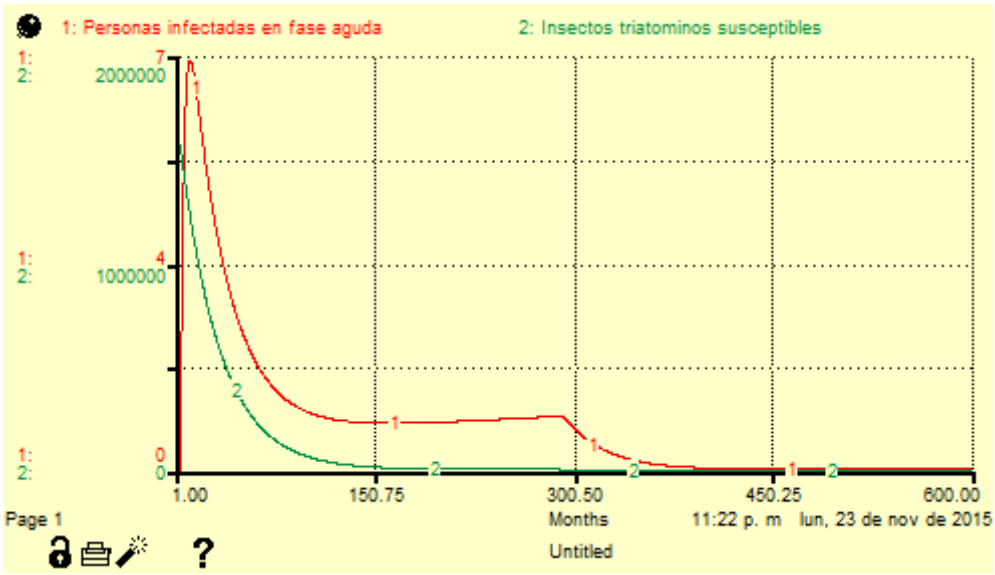
Sin embargo, como se demostró a través de la matriz de la próxima generación, esta variable no es relevante para el número básico de reproducción. A continuación, se mostrará que experimentalmente se concuerda con este resultado. En las gráficas 16 y 17 se pude observar que el comportamiento se mantiene hasta cierto “punto de quiebre” donde la población de triatominos susceptibles desaparece (como se muestra en la gráfica 18). Este “punto de quiebre” sucede pues al no tenerse en cuenta las dinámicas poblacionales en los vectores, llega un momento en que el tener una tasa de nacimiento de triatominos menor a su tasa de muerte resulta insostenible dentro del modelo. No obstante, lo importante a resaltar es que antes de este punto crítico, el comportamiento de la población se mantiene, lo cual reafirma que la tasa de nacimiento de triatominos no es un factor determinante al momento de controlar la enfermedad.



Gráfica 16: Comportamiento de las poblaciones cuando 50% de las viviendas se encuentran en el mejor estado posible.



Gráfica 17: Comportamiento de las poblaciones cuando 100% de las viviendas se encuentran en el mejor estado posible.

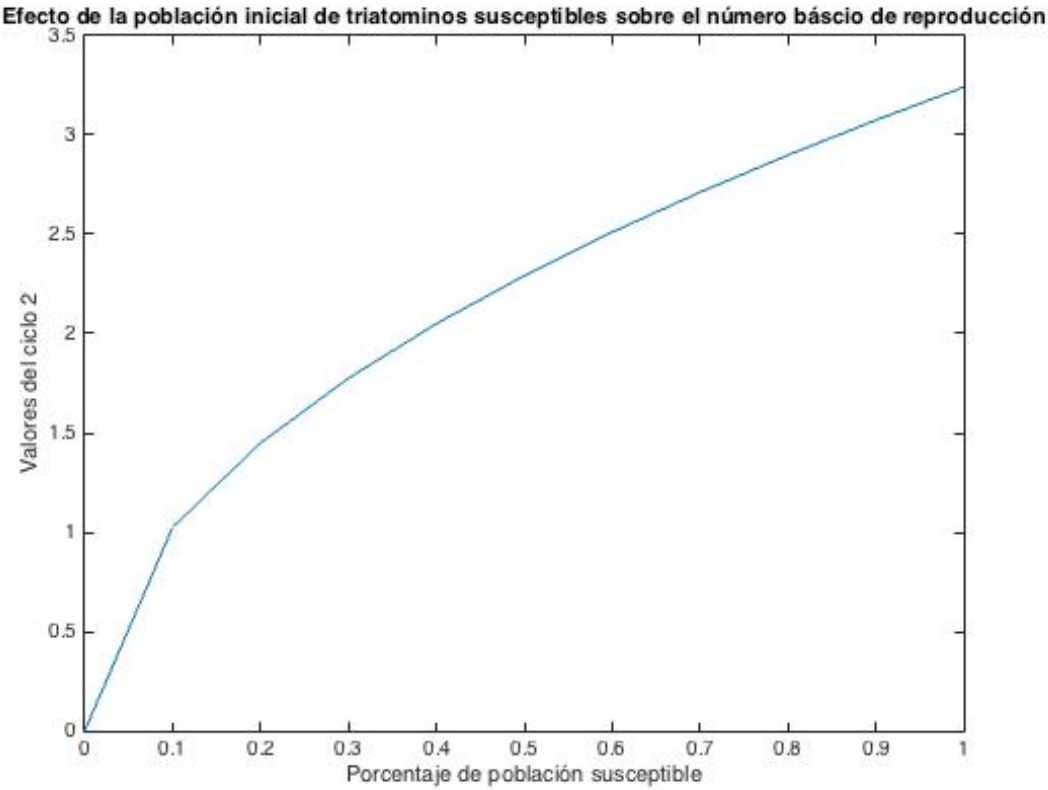


Gráfica 18: Comportamiento de los enfermos y los insectos cuando 100% de las viviendas se encuentran en el mejor estado posible.

Ahora bien, aunque la tasa de nacimientos en los vectores no es un factor que influya sobre el crecimiento de la enfermedad en la población, la matriz de la próxima generación muestra que la cantidad inicial de vectores susceptibles sí lo es. ¿Qué pasaría entonces si se pudiera modificar directamente esta cantidad?

Recuerde que un vector susceptible es aquel capaz de infectarse a través de picar a una persona infectada. Qué sucedería entonces si se pudiera inmunizar a los triatominos de tal manera que no puedan ser portadores del *R. prolixus*. Más aún, que esta inmunización sea lo suficientemente fuerte para ser transmitida a las generaciones futuras, aprovechando así su alta reproducción, y el corto tiempo de vida de su contraparte susceptible.

Pues esto ya se ha propuesto para combatir la transmisión del dengue en Colombia (Posada & Acevedo, 2015). Si esto es aplicado sobre el modelo, cambiaría el supuesto que para el cálculo de la virulencia (H) la totalidad de la población de triatominos es susceptible. Por el contrario, el porcentaje de población susceptible variaría y afectaría a la virulencia de la manera en que se ve en la gráfica 19 a continuación.



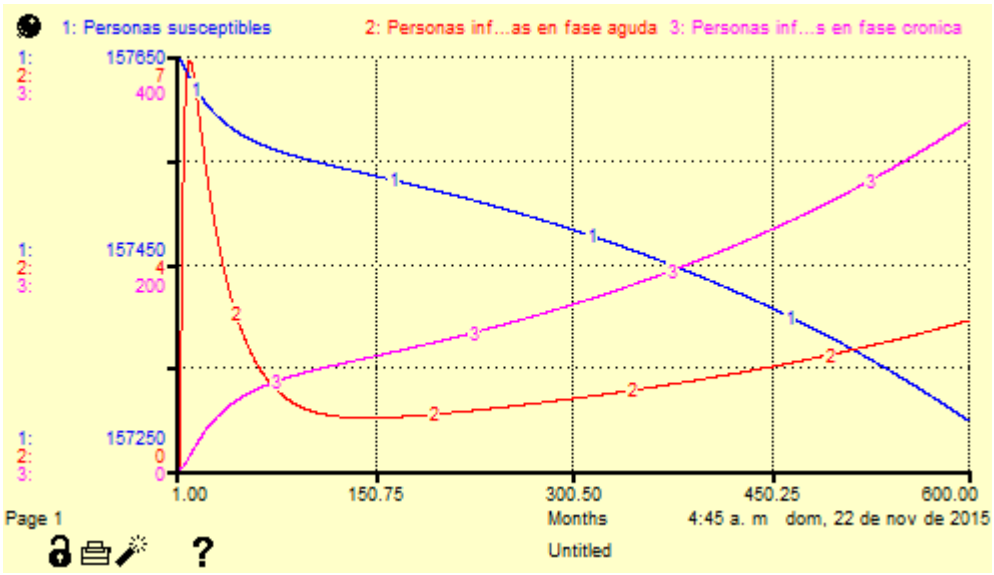
Gráfica 19: Comportamiento de la cota superior de R_0 a medida que se disminuye el porcentaje inicial de vectores susceptibles.

A diferencia del rociamiento de las viviendas o del uso de un medicamento, donde en ambos se observó que en aún en una efectividad del 100% no se logra la meta de dejar la virulencia (H) bajo; la gran ventaja en el acercamiento de la inmunización es que se puede mejorar continuamente hasta que la población de vectores susceptibles sea nula. Logrando entonces un control sobre la permanencia de la enfermedad.

9.1.4 Comportamientos neutrales

Es interesante presentar que la tasa de nacimiento de personas infectadas debido a una madre infectada no es una variable fuerte para alterar del comportamiento de la población de infectados.

Aún suponiendo un caso extremo donde la totalidad de las mujeres infectadas da a luz a un hijo infectado, se puede observar en la gráfica 19 que esto no es suficiente para cambiar el comportamiento inicial de las poblaciones de infectados. Como actualmente, la tasa real ronda el 8% (Instituto Nacional de Salud, 2012), no es un factor preocupante que requiera un análisis más profundo.



Gráfica 19: Comportamiento de las poblaciones si se asume que el 100% de las madres infectadas dan a luz a hijos infectados.

9.1.5 Conclusión de alternativas

Definitivamente, una de las alternativas más interesantes para perseguir sería la alteración genética de los vectores triatominos para hacerlos inmunes al parásito *T. cruzi* y transmitir esta característica a las siguientes generaciones. Teniendo en promedio una generación nueva de triatominos cada dos años, sería solamente cuestión de tiempo el tener una población de vectores completamente incapaces de transmitir la enfermedad de Chagas.

Lastimosamente, llegar a descubrir cómo alterar la genética de los triatominos de manera provechosa y ponerla en marcha puede tardar varios años de investigación, desarrollo y acción política. De igual manera, el desarrollo de un medicamento efectivo puede llegar a tardar bastantes años. Pero, a diferencia de la primera alternativa, concluyendo desde los resultados no se recomienda invertir recursos en investigación y desarrollo de un medicamento que ataque la enfermedad de Chagas. Esto pues los mismos recursos pueden ser utilizados para asegurar un rociamiento periódico de las viviendas, llegando a los mismos resultados de efectividad en el control de la propagación de la enfermedad en el Departamento del Casanare.

9.2 Estudiar el ciclo silvestre

Además de los métodos expuestos, se plantea analizar para futuros trabajos una nueva dimensión y metodología de ataque: la biodiversidad. Esta propuesta nace a partir del trabajo presentado por Keesing y compañía, en el cual se analizan los impactos de la biodiversidad en la transmisión de enfermedades infecciosas. En este estudio se concluye que, a pesar de que la intuición parece indicar que a mayor biodiversidad debería haber una mayor

propagación de la enfermedad por haber un albergue mayor de reservorios, se ha observado que en la práctica sucede que la biodiversidad parece proteger a los organismos, incluidos los humanos, de la trasmisión de enfermedades infecciosas (Keesing, et al., 2010). La aproximación que se podría realizar para abstraer este factor en el estudio es a través de la inclusión de la deforestación y la plantación de palma africana, junto con su relación en la cantidad de animales del ciclo silvestre que puede soportar el ecosistema (concepto conocido como *capacidad de carga*).

9.2.1 Reservas Silvestres

Para comenzar, el ciclo silvestre de la enfermedad se mantiene debido a la existencia de reservas silvestres de la enfermedad que consisten en pequeños mamíferos. Estos, al ser picados por los vectores infectados, cargan con la infección (de ahí el nombre de *reservas*) y la transmiten a los insectos vectores que se alimentan de su sangre (Guhl, Epidemología, 2007). Por tal motivo, las primeras variables a tomar en cuenta son: la cantidad de animales silvestres infectados y la cantidad de animales silvestres susceptibles a la enfermedad.

Aproximar los datos importantes de las reservar silvestres se puede realizar a partir de la información que se tiene de la especie *Didelphis marsupialis*. Esta aproximación es válida pues la especie tiene "resiliencia a los hábitats degradados, presencia en peridomicilios y una relación estrecha con los árboles de palma" (Cordovez, et. al., 2014).

La información se presenta en la Tabla 3. Se debería tener en cuenta que a pesar de haber transmisión vertical de la enfermedad (transmisión de la enfermedad al feto desde la madre), se puede asumir que no hay muerte del animal causada por la enfermedad (Kribs-Zaleta & Mubayi, 2012).

CONSTANTE	VALOR	REFERENCIA
Tasa Nacimiento	6.4 crías/año	(Gallego Murillo, 2012)
Capacidad de Carga	1.6 marsupiales/palma	(Gallego Murillo, 2012)
Tasa de Picada Vector	36.5 picadas/año	(Rabinovich & Himschoot, 1990)
Probabilidad de Infección por Picada	10^{-4}	(Cordovez, Rendon, Gonzalez, & Guhl, 2014)
Probabilidad de Nacimiento Infectado	9.1%	(Moreno, et.al., 2012)
Tasa de Muerte	0.4 marsupiales/año	(Gallego Murillo, 2012)

Tabla 7: Valores relevantes de los reservorios silvestres para construir un modelo**.**

9.2.2 Deforestación del Casanare y Plantación de Palma Africana

Al ser el Casanare una población que genera sus ingresos principalmente a través de la agricultura y la ganadería (Ministerio de Agricultura, 2013), su intervención a las distintas áreas geográficas con el fin de poseer un mayor territorio para la agricultura y la crianza de ganado genera un aumento en la domiciliación de los vectores triatominos debido al proceso de deforestación que se debe llevar a cabo para este fin. Siendo el departamento de Casanare "la zona con mayor deforestación del país" (Ministerio de Ambiente, 2014).

Gran parte de esta deforestación está destinada a las plantaciones de palma de aceite, pues en el departamento se espera que para el 2020 3 millones de hectáreas sean usadas en el cultivo de palma de aceite (Fedepalma, 2014). Esto es relevante pues tanto el *R. Prolixus* (vector triatomino tratado en este trabajo) como el *D. Marsupialis* poseen como hábitat natural la palma de aceite (Zeledon, et. al, 2006; Yeo, et al., 2005). Por lo tanto, la deforestación disminuye la biodiversidad de la zona, para soportar la enfermedad; al mismo tiempo que el aumento en palmas de aceite incrementa la capacidad de carga de vectores y reservorios triatominos, fortaleciendo el ciclo silvestre de la enfermedad de Chagas.

10 Actores Relevantes

Si en verdad se busca un cambio, y se quiere un control efectivo de la Enfermedad de Chagas, se necesita un trabajo conjunto entre las distintas entidades que tienen poder de decisión sobre el rumbo que deben tomar las políticas de control. Como lo muestra el libro "Enfermedad de Chagas", este debe ser un trabajo conjunto entre distintas entidades como Universidades, el Ministerio de Salud, Institutos de Salud y Alcaldías Municipales (Guhl, et al., 2007, p. 157).

De esta manera se presenta el concepto de "Actores Relevantes", los cuales se definen como aquellas entidades cuyas decisiones pueden incidir en el comportamiento de la variable de interés (Sterman, 2000). En este trabajo la variable de interés es la cantidad de personas infectadas con la enfermedad de Chagas en el departamento de Casanare, Colombia.

Luego de realizar una serie de entrevistas y haber revisado bibliografía sobre los aspectos de la enfermedad de Chagas en general y sobre su relación con la población colombiana y la población del Casanare en específico, se logró identificar a los principales actores relevantes. Aquellas entidades fundamentales al momento de buscar establecer escenarios y políticas que incidan en la disminución de la población del Casanare infectada. Para esto, se tomó en consideración los retos que presenta el gobierno nacional para asegurar el bienestar y la salud de sus habitantes, los programas de control que se han estructurado con este objetivo y la preocupación de otras entidades al momento de implementar estos programas.

10.1 Ministerio de Salud y Autoridades Municipales

El gobierno nacional es “la máxima autoridad que dirige, controla y administra las diversas instituciones del estado, las cuales llevan a cabo las actividades estatales necesarias para asegurar el futuro de la salud, educación, propiedad, vivienda, etc…” (Lopez & Posada, 2010). Una de estas instituciones es el Ministerio de Salud y Protección Social, el cual tiene dentro de sus objetivos “Formular, adoptar, coordinar la ejecución y evaluar estrategias de promoción de la salud y la calidad de vida, y de prevención y control de enfermedades transmisibles” (Ministerio de la Salud y Protección Social, 2011; Ministerio de la Salud y la Protección Social, 2012). Dentro de estas enfermedades trnasmisibles que se encuentra la enfermedad de Chagas.

La principal característica que tiene este Ministerio es su potestad de hacer políticas y enfocar recursos en la búsqueda del mejoramiento del bienestar de la población. Sin embargo, en Colombia la salud pública es descentralizada, esto quiere decir que las competencias administrativas son a nivel municipal. En otras palabras, el Ministerio de Salud entrega los recursos a las autoridades municipales, las cuales tienen la responsabilidad de tomar las decisiones sobre la adopción, ejecución y evaluación de programas de control a las enfermedades de transmisión vectorial (Guhl, et. al., 2005).

De esta manera, las decisiones que tomen las autoridades municipales dentro del departamento de Casanare con respecto a la problemática que se está estudiando posee una alta influencia dentro de la prevención de la trasmisión de la enfermedad, puesto que tiene la potestad de escoger la cantidad de recursos asignados para esta labor, además de elegir el programa de prevención a seguir.

10.2 Universidades

No obstante, el Ministerio de Salud debe velar por la transmisión y control de todas las enfermedades transmisibles en el país. Esto implica que las enfermedades que presenten una mayor emergencia sean las que reciban la mayor cantidad de recursos. Por lo tanto, gracias a la participación de las distintas instituciones académicas y su constante presión sobre las leyes gubernamentales, en el año 2000 el Ministerio de Salud reconoció a los hogares infestados con vectores triatominos como “casas enfermas” (Guhl, 2014). Esto implica que al percibirse un aumento en la cantidad de habitantes infectados con la Enfermedad de Chagas, el estado provee el presupuesto para mejorar las condiciones de vivienda de la región.

Se observa entonces que se debe considerar a las universidades del país como actor relevante. Estas organizaciones, preocupadas por la situación actual de la enfermedad de Chagas, han decidido tomar acción para ayudar a mitigar la cantidad de casos efectivos de personas enfermas.

Para explicar la relevancia de este actor es necesario resaltar que actualmente en Colombia no existe un programa de prevención o de control de la enfermedad de Chagas que se esté llevando a cabo por parte del Estado (Guhl, Enfermedad de Chagas, 2007). Sin embargo, se puede encontrar que varios departamentos del país han tomado acciones de control y prevención importantes - principalmente los departamentos de Boyacá, Santander y Casanare - (Guhl, 2007). La pregunta es entonces ¿cómo se han llegado a estas acciones? El doctor Felipe Guhl explica que estas actividades están siendo adelantadas principalmente por la academia (Guhl, Entrevista, 2014). Por lo tanto son estas entidades las que han estado encargas de brindar información a la población sobre la enfermedad y qué pueden hacer para mitigarla, al tiempo que desarrollan programas de control como la fumigación de hogares (Angulo Silva, 2005).

10.3 Habitantes del Casanare

Como se resaltó anteriormente, el gobierno tiene el poder de dirigir recursos a la búsqueda de prácticas que mejoren el estado de salud de la población frente a la enfermedad de Chagas. El problema radica en que el gobierno, a pesar de reconocer la existencia de la enfermedad, realiza pocas acciones sanitarias que busquen su prevención o control al no considerarla una enfermedad prioritaria (Guhl, Enfermedad de Chagas, 2007).

A pesar de esto, existen ciertas acciones sencillas que se cree pueden ayudar a prevenir la enfermedad como revocar las grietas de las paredes o mantener los animales domésticos lo más alejado posible de las viviendas (Briceño-León, 2007). Pero resulta preocupante descubrir que, aun cuando la mayoría de los habitantes del Casanare tienen un conocimiento general sobre la enfermedad de Chagas junto con distintos métodos de prevención (Guhl, Entrevista, 2014), se percibe que estas personas toman poco o nada de acción al respecto (Cordovéz, Entrevista, 2014), aún cuando es el que más se ve afectado con su prevalencia, por consiguiente el que más se ve beneficiado con programas de prevención.

Por esta razón se puede asumir que la población del Casanare no toma acción sobre la enfermedad, aún cuando puede ser beneficioso para ellos. Entonces se hace también importante idear campañas que lleven a estas familiar a tomar acción y no esperar pasivamente a que llegue una solución. Este supuesto puede cambiar en el futuro, cuando se tengan resultados del estudio que está realizando actualmente la organización Red Chagas Colombia sobre el comportamiento general de la población del Casanare frente a la enfermedad (Colciencias, 2015).

11 Conclusiones

Siguiendo con fidelidad los resultados presentados, se pueden delimitar dos rutas de acción en adelante: la primera ruta se plantea como una solución a corto y mediano plazo, esta consiste en un trabajo conjunto entre la gobernación del Casanare, el Ministerio de Salud y la población del departamento para asegurar un rociamiento con insecticidas a las viviendas por lo menos dos veces al año, procurando que aumente a tres veces al año; la segunda ruta es una solución a largo plazo que requiere el apoyo conjunto entre las universidades y el gobierno colombiano, esta es el desarrollo de un método de inmunización de los vectores triatominos al *R. prolixus.*

Para perseguir estas metas, se propone un objetivo similar al presentado al Ministerio de Protección Social en el 2005 por varios representantes de la comunidad científica y distintas autoridades de salud departamentales (Guhl, Enfermedad de Chagas, 2007, pp. 188-190).

El objetivos principal es la planeación conjunta entre los municipios del Casanare, sus habitantes y la comunidad científica de una dirección, coordinación, formulación de políticas generales, evaluación y seguimiento de un programa de control de la enfermedad de Chagas a través del rociamiento de viviendas. Esto implica oficializar guías de manejo, lineamientos y protocolos de vigilancia que deben ser efectivamente implementados y dados a conocer a la población a través de campañas de información.

Adjunto a este objetivo debe planearse una estrategia efectiva de recolección y centralización de datos que puedan ser estudiados por centros de investigación para identificar las regiones de mayor prevalencia y transmisión de la enfermedad. De esta forma, se pueden concentrar los esfuerzos de personal, los costos de insumos químicos y la apropiación de tecnologías para atacar aquellas zonas de mayor afectación.

Al momento de planear estas políticas de acción, es relevante entender que a diferencia de países como Chile o Uruguay, en Colombia los triatominos no se encuentran estrictamente domiciliados (Guhl, 2007). Esto implica que constantemente existe un riesgo de reinfestación de las viviendas, a pesar del rociado con insecticidas. Por ende, la necesidad de establecer acciones encaminadas a encontrar la forma de inmunizar a los triatominos del *R. prolixus.*

11.1 Costos Asociados a las Alternativas

En este estudio se menciona varias veces que los entes gubernamentales en Colombia deben velar por controlar las enfermedades por transmisión, para disminuir los daños que estas ocasionas. Ahora bien, existiendo una variedad de enfermedades transmisibles en Casanare, unas con un impacto en la sociedad más visible que otras, como sucede con el Dengue o la Malaria

(Secretaría de Salud Departamental de Casanare, 2013) ¿por qué se deberían destinar recursos para el control de la Enfermedad de Chagas?

Un posible acercamiento para dar respuesta a esta pregunta es a través del estudio del costo-efectividad de implementar programas de control a través de rociamiento de insecticidas. Indicadores como este son tomados en cuenta con mucha relevancia a nivel gubernamental y son de gran relevancia al momento de tomar decisiones sobre los programas a implementar o las investigaciones a financiar (Castillo, 2007).

Lastimosamente, en Colombia es escasa la información sobre los costos o las proporciones de costo-efectividad de la enfermedad de Chagas (Castillo, 2007). Sin embargo, se pueden dejar los lineamientos de los factores que se deberían estudiar para obtener este índice.

Para calcular es costo-beneficio y las repercusiones sociales de la enfermedad de Chagas en el Casanare, se deben considerar tres dimensiones (Castillo, 2007): la primera dimensión es la más directa, y está asociada al "costo de provisión de cuidados de salud tanto de prevención como de tratamiento" (p. 207); la segunda dimensión es monetizar la ansiedad, angustia y dolor que viven los familiares y amigos del enfermo; finalmente, la tercera dimensión es la disminución en la capacidad del enfermo para funcionar de manera normal, negándole un trabajo remunerado y reduciendo sus años de vida productivos.

Naturalmente, el cálculo de los costos en cada una de las dimensiones descritas es altamente complejo. Sobretodo al momento de asignar valores monetarios al dolor, la angustia y el cuidado de la familia al enfermo. Idealmente, el cálculo del costo-beneficio debería incluir estas tres dimensiones al momento de determinar el costo que se reduce en cada una de ellas si se invierte en alternativas de prevención y control como el rociamiento de hogares.

Para exponer un acercamiento a los costos de rociamiento de hogares, uno de los estudios en costos más confiables que existen en este momento fue el realizado en 1989 por Oliveria-Filho donde de halló que el costo de rociamiento es de aproximadamente USD $30 por año por casa (Castillo, 2007). Posterior a este estudio ha habido varias aproximaciones en distintos países de Suramérica (como Chile o Brasil) del costo-beneficio de la enfermedad de Chagas. Pero se ha mostrado que los supuestos que asumen estos estudios resulta en valores sobreestimados (p. 212), por lo tanto poco confiables. Por lo pronto, con el ánimo de presentar una aproximación a estos valores, tratándolos con precaución por estar sobreestimados, el análisis de costo-beneficio en Brasil arrojó resultados de un ahorro de USD $17 por cada USD $1 invertido en prevención (Moncayo & Silveira, 2009).

11.2 Tendencia a la baja en Casanare

En la sección 3.2 dentro de la explicación de la situación actual de la enfermedad de Chagas en el departamento del Casanare, se presentó a gráfica 2 donde de muestra una tendencia a la baja en la cantidad de casos crónicos reportados de la enfermedad en el departamento entre los años 2008 y 2013. Uno de los objetivos de este trabajo era encontrar una explicación a este comportamiento.

Como se ha demostrado en este estudio, si no existe un control sobre la transmisión de la enfermedad de Chagas, esta puede llegar a contagiar una gran proporción de la población. Esto se infiere de los resultados de la gráfica 8 donde se muestra el comportamiento de las personas en fase aguda y en fase crónica si no se aplican políticas de control y de la sección 8.3 donde se calcularon las proporciones de población infectada si se permite el curso de transmisión de la enfermedad.

Al mismo tiempo se ha concluido que las acciones las acciones gubernamentales en esta problemática se han frenado desde el año 2000 en que finalizó el estudio de la situación de la enfermedad, sin pasar a las fases de planeación y control. Aún así, los datos obtenidos presentan una disminución en los casos reportados de enfermos en estado crónico.

Una explicación coherente que se puede dar a esta aparente contradicción es que se ha vuelto más complejo identificar y presentar un diagnóstico acertado de esta enfermedad. Varias razones pueden sustentar esta hipótesis. La primera de ellas es que las maneras de confirmar la presencia del *T. cruzi* es a través de un examen patológico o de parásitos, pero la verificación patológica es rara y la presencia de parásitos es poco frecuente en la fase crónica (Rosas, 2011). Si a esto se le suma una baja sensibilización del personal en esta enfermedad, se dificulta aún más el establecimiento de un diagnóstico acertado (p. 243). Por otro lado, los métodos médicos se han tardado en incluir modos emergentes de transmisión como la transmisión oral a través de la ingesta de alimentos contaminados, donde la presentación clínica difiere de las formas tradicionales de infección (Panamerican Health Organization, 2010). Este caso es altamente relevante en el departamento del Casanare, en donde se extraen los frutos de las plantaciones de palmas africanas para consumo de vino de palma, en cuya bebida se han encontrado triatominos infectados con *T. cruzi* (Rosas, 2011).

12 Referencias

Amaya, D. A. (2014). Acercamientos a la Epidemología de una Enfermedad a través de Sistemas Compartimentales. Universidad de Los Andes, Departamento de Matemáticas. Bogotá D.C.: Universidad de Los Andes.

Angulo Silva, V. M. (2005). Ensayo de estratégias de control y vigilancia de Triatoma dimidiata en Colombia. VI Reunión de la Iniciativa Andina para el Control de la Enfermedad de Chagas (pp. 89-102). Bogotá: Universidad de Los Andes.

Aschwanden, C. (2014). WebMD. Retrieved 1 de Diciembre de 2014 from Health & Pregnancy: http://www.webmd.com/baby/features/fertility-101

Brauer, F., & Castillo-Chavez, C. (2010). Mathematical Models in Population Biology and Epidemology (Second Edition ed.). New York, United States of America: Springer.

Briceño-León, R. (2007). Las dimensiones sociales de la enfermedad de Chagas. In S. C. Cardiovascular, F. Rosas, D. Vanegas, & M. Cabrales (Eds.), Enfermedad de Chagas (pp. 197-204). Bogotá, Colombia: Cardiovascular, Sociedad Colombiana de Cardiología y Cirugía.

Cámara de Comercio de Casanare. (2012). Observatorio de Competitividad: Departamento de Casanare. Resultados. Yopal, Casanare: Casanare Productivo.

Castillo, M. (2007). Dimesnión de Costos de la enfermedad de Chagas. In F. Rosas, D. Vanegas, & M. Cabrales (Eds.), Enfermedad de Chagas (pp. 205-215). Bogotá, Colombia: Sociedad Colombiana de Cardiología y Cirugía Cardiovascular.

Clayton, J. (2010). Chagas disease 101. Nature (465), S4-S5.

Colciencias. (2015). Red Chagas Colombia. Retrieved 15 de Diciembre de 2014 from P2-Determinantes socioculturales y dinámicas del acceso a diagnóstico y atención integral de la enfermedad de Chagas en Casanare, Magdalena y Cundinamarca:

http://www.redchagascolombia.org/p2-determinantes-socio-culturales-y-evaluacion-cualitativa

Cordovéz, J. (1997). Aplicación de los S.I.D: Georeferenciación del mal de Chagas en Colombia. (D. Facultad de Ingeniería, Ed.) Bogotá, Colombia: Universidad de Los Andes.

Cordovéz, J. (10 de Diciembre de 2014). Entrevista sobre las reacciones de los habitantes del Casanare frente al conocimiento de la enfermedad de Chagas. (D. A. Amaya, Interviewer) Bogotá, Colombia.

Cordovéz, J., Rendon, L., Gonzalez, C., & Guhl, F. (2014). Using the basic reproduction number to assess the effects of climate change in the risk of Chagas disease transmission in Colombia. (Elsevier, Ed.) Acta Trópica , 129, 74-82.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (1993). Censo Nacional de Población y Vivienda. Bogotá, Colombia: Archivo Naciona del Datos.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2005). Censo Nacional de Población y Vivienda. Bogotá, Colombia: Archivo Nacional de Datos.

Erazo, D., & Cordovéz, J. (2011). A mathematical model approach to understand the dynamics of Chagas disease in Colombia. (Biomédica, Ed.) XV Congreso de parasitología y medicina tropical, 31, 3-315.

Fedepalma. (2014). SISPA: Sistema de Información Estadística del Sector Palmero. Retrieved 10 de 12 de 2014 from Nuevas Siembras y Renovaciones: http://sispaweb.fedepalma.org/SitePages/areas.aspx

Gallego Murillo, J. S. (2012). Diseño e implementación de un modelo matemático del ciclo silvestre de la transmisión de la enfernedad de Chagas. Universidad de Los Andes. Bogotá: Universidad de Los Andes.

Guhl, F. (1999). Estado actual del control de la enfermedad de Chagas en Colombia. Problemática de la enfermedad de Chagas. Simposio Internacional. Academia Nacional de Medicina. II, pp. 103-116. Buenos Aires: MEDICINA.

Guhl, F. (2000). Enfermedad de Chagas o Tripanosomiasis Americana: Situación Actual en Colombia. Revista MEDICINA , 22 (2), 89-95.

Guhl, F. (2007). Enfermedad de Chagas: ¿Son realmente útiles las estrategias de control y prevención? Estado actual ¿Qué se debe hacer? In S. C. Cardiovascular, F. Rosas, D. Vanegas, & M. Cabrales (Eds.), Enfermedad de Chagas (pp. 187-196). Bogotá, Colombia: Cardiovascular, Sociedad Colombiana de Cardiología y Cirugía.

Guhl, F. (2007). Epidemología de la enfermedad de Chagas en Latinoamérica y Colombia. In S. C. Cardiovascular, F. Rosas, D. Vanegas, & M. Cabrales (Eds.), Enfermedad de Chagas (pp. 7-14). Bogotá, Colombia: Sociedad Colombiana de Cardiología y Cirugía Cardiovascular.

Guhl, F. (8 de Diciembre de 2014). Entrevista sobre la relación del departamento de Casanare con la enfermedad de Chagas. (D. A. Amaya, Interviewer) Bogotá, Colombia.

Guhl, F., Aguilera, G., Pinto, N., & Vergara, D. (2005). Distribución Geográfica de las Especies de Triatominos en los Departamentos endémicos para la Enfermedad de Chagas en Colombia. In F. Guhl (Ed.), VI Reunión de la Iniciativa Andina para el Control de la Enfermedad de Chagas (pp. 23-39). Bogotá: Universidad de Los Andes.

Guhl, F., Angulo, M., Restrepo, M., Nicholls, S., & Montoya, R. (2003). Enfermedad de Chagas: Estado del arte de la enfermedad de Chagas en Colombia y estrategias de control. Biomédica , 23 (1), 31-37.

Guhl, F., Nicholls, R., Montoya, R., Rosas, F., Velasco, V., Mora, E., et al. (2007). Rápida negativización serológica después del tratamiento etiológico para enfermedad de Chagas en un grupo de escolares colombianos. In F. Rosas, D. Vanegas, & M. Cabrales

(Eds.), Enfermedad de Chagas (pp. 153-157). Bogotá, Colombia: Sociedad Colombiana de Cardiología y Cirugía Cardovascular.

Guhl, F., Restrepo, M., Angulo, V. M., Antunes, C., Campbell-Lendrum, D., & Davies, C. (2005). Lessons from a national survey of Chagas disease transmission risk in Colombia. TRENDS in Parasitology , 21 (6), 259-262.

Instituto Nacional de Salud. (2012). Informe del evento: Enfermedad de Chagas. Evento, Vigilancia y control en salud pública.

Keesing, F., Belden, L., Daszak, P., Dobson, A., Harvell, C., Holt, R., et al. (2010). Impacts of biodiversity on the emergence and transmission of infectious diseases. Nature (468), 647–652.

Kribs-Zaleta, C., & Mubayi, A. (2012). The role of adaptations in two-strain competition for sylvatic Trypanosoma cruzi transmission. Journal of Biological Dynamics , 6 (2), 813-835.

Lagarda, E. (2011). Introducción a la Dinámica de Sistemas. Retrieved 22 de Noviembre de 2'15 from El Pensador Sistémico: http://jmonzo.net/blogeps/ids1.pdf

Lopez, H., & Posada, R. (2010). Manual de Constitución y Democracia. Bogotá, Colombia: Universidad de Los Andes.

Luquetti, A., & Rassi, A. (2007). Tratamiento etiológico de la enfermedad de Chagas. In F. Rosas, D. Vanegas, & M. Cabrales (Eds.), Enfermedad de Chagas (pp. 143-149). Bogotá D.C.: Sociedad Colombiana de Cardiología y Cirugía Cardiovascular.

Ministerio de Agricultura. (2013). Pacto nacional por el agro y el desarrollo rural.

Ministerio de la Salud y la Protección Social. (2012). Gestión para la Vigilancia Etomológica y Control de la Transmisión de la Enfermedad de Chagas. Instituto Nacional de la Salud. Colombia: Plan Nacional de Salud Pública.

Ministerio de la Salud y la Protección Social. (2012). Protocolo para la Vigilancia en Salud Pública de la Enfermedad de Chagas. Insituto Nacional de la Salud. Colombia: Plan Nacional de Salud Pública.

Ministerio de la Salud y Protección Social. (2011). Instucional: ¿Quiénes somos? Retrieved 09 de Octubre de 2014 from Objetivos y Funciones del Ministerio de Salud y Protección Social: http://www.minsalud.gov.co/Ministerio/Institucional/Paginas/institucional-objetivos-funciones.aspx

Moncayo, Á., & Silveira, C. (2009). Current epidemiological trends for Chagas disease in Latin America and future challenges in epidemiology, surveillance and health policy. Memórias do Instituto Oswaldo Cruz, 104 (Suppl. 1), pp. 17-30. Rio de Janeiro.

Moreno, E., Rivera, I., Moreno, S., Alarcón, M., & Lugo-Yarbuh, A. (2012). Transmisión vertical de Trypanosoma cruzi en ratas Wistar durante la fase aguda de la infección. Investigaciones Parasitológicas "J.F. Torrealba". Venezuela: Universidad de Los Andes.

Nicholls, R. (2005). ¿Qué se está haciendo actualmente con los paciente chagásticos en Colombia? En F. Guhl (Ed.), Memorias del Primer Taller Internacional sobre Control de la Enfermedad de Chagas (págs. 40-44). Bogotá: Ediciones Uniandes.

Padilla, J. C. (2005). Situación de la enfermedad de Chagas en Colombia. In F. Guhl (Ed.), VI Reunión de la Iniciativa Andina para el Control de la Enfermedad de Chagas (pp. 17-22). Bogotá: Universidad de Los Andes.

Panamerican Health Organization. (2010). Strategy and plan of action for Chagas disease prevention, control and care. Washington D.C.: World Health Organization.

Posada, G., & Acevedo, N. (20 de 05 de 2015). Bacteria podría ayudar a reducir la transmisión del dengue. Retrieved 10 de 11 de 2015 from Noticias Universidad de Antioquia: http://portal.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/udea-noticias/udea-noticia/?page=udea.inicio.udea.noticias.noticia&urile=wcm%3Apath%3A%2FPortalUd

eA%2FasPortalUdeA%2FasHomeUdeA%2FUdeA%2BNoticias%2FContenido%2FasNoticias%2FCiencia%2Fbacteria-podria-aydar-reducir-transmision-dengue

Qiu, Z. (2008). Dynamical behavior of a vector-host epidemic model with demographic structure. Computers and Mathematics with Applications , 56, 3118-3129.

Rabinovich, J., & Himschoot, P. (1990). A Population-Dynamics Simulation Model of the Main Vectors of Chaga's Disease Transmission, Rhodnius prolixus and Triatoma infestans. Ecological Modelling (52), 249-266.

Rocha Leite, G., Biral dos Santos, C., & Flaqueto, A. (2011). Influence of the landscape on dispersal of sylvatic triatomines to anthropic habitats in the Atlantic Forest. Journal of Biogeography , 38, 651-663.

Romero-Ruiz, M., Flantua, S., Tansey, K., & Berrio, J. (2012). Landscape transformations in savannas of northern South America: Land use/ cover changes since 1987 in the Llanos Orientales of Colombia. Applied Geography , 32, 766-776.

Rosas, F. (2011). Enfermedad de Chagas. Revista Colombiana de Cardiología , 18 (5), 241-244.

Rosas, F., Guhl, F., & Luquetti, A. (2007). Tratamiento etiológico de la enfermedad de Chagas. In F. Rosas, D. Vanegas, & M. Cabrales (Eds.), Enfermedad de Chagas (pp. 139-143). Bogotá D.C.: Sociedad Colombiana de Cardiología y Cirugía Cardiovascular.

Sánchez-Cordero, V., Illoldi-Rnagel, P., Linaje, M., Sarkar, S., & Townsend Peterson, A. (2005). Deforestation and extant distributions of Mexican endemic mammals. Biological Conservation , 126, 465-473.

Secretaría de Salud de Casanare. (2005). Situación de la enfermedad de Chagas en el departamento de Casanare, Colombia. In F. Guhl (Ed.), VI Reunión de la Iniciativa Andina para el Control de la Enfermedad de Chagas (pp. 147-165). Bogotá: Universidad de Los Andes.

Secretaría de Salud Departamental de Casanare. (2013). Informe de Gestión. Programa: Enfermedades Transmitidas por Vectores 2013. Situación Actual de las ETV a Semana 52 del 2013. Periodo de Análisis: 2008-2013. Yopal, Casanare, Colombia: Gobernación de Casanare.

Secretaría de Salud Departamental de Casanare. (2013). Informe de Gestión. Programa: Enfermedades Transmitidas por Vectores 2013. Situación Actual de las ETV a Semana 52 del 2013. Periodo de Análisis: 2008-2013. Yopal, Casanare, Colombia: Gobernación de Casanare.

Silveira, A. (2005). Estrategias para Lograr la Eliminación Intra-Domiciliaria de Rhodnius prolixus en Colombia. In F. Guhl (Ed.), Memorias del Primer Taller Internacional sobre Control de la Enfermedad de Chagas (pp. 45-51). Bogotá: Ediciones Uniandes.

Spagnuolo, A. M., Shillor, M., & Stryker, G. (2011). A model for Chagas disease with controlled spraying. Journal of Biological Dynamics , 5 (4), 299-317.

Sterman, J. (2000). Bussiness Dynamics: Systems thinking and modelling for a complex world. Estados Unidos de América: McGraw-Hill Higher Education.

Tarleton, R. (Marzo de 2013). The role of immunology in combating trypanosoma cruzi infection and Chagas disease. Revista Española de Salud Pública , 33-39.

van den Driessche, P., & Watmough, J. (2002). Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission. Mathematical Biosciences (180), 29-48.

World Health Organization. (2002). Control of Chagas Disease. Geneva: WHO Technical Support Series.

Yeo, M., Acosta, N., Llewellyn, M., Sanchez, H., Adamson, S., Miles, G., et al. (2005). Origins of Chagas disease: Didelphis species are natural hosts of Trypanosoma cruzi and

armadillos hosts of Trypanosoma cruzi II, including hybrids. Int. J. Parasitol , 35, 225-233.

Zeledon, R., Marin, F., Calvo, N., Lugo, E., & Valle, S. (2006). Distribution and ecological aspects of Rhodnius pallescens in Costa Rica and Nicaragua and their epidemiological implications. Mem. Inst. Oswaldo Cruz , 101, 75-79.

I. APÉNDICE A
Fórmulas del Modelo

Insectos_triatominos_infectados(t) = Insectos_triatominos_infectados(t - dt) + (Picada_de_insecto_triatomino_a_persona_infectada - Muerte_de_infectados_por_rociamiento - Muerte_natural_de_insectos_infectados) * dt
INIT Insectos_triatominos_infectados = 1000
INFLOWS:
Picada_de_insecto_triatomino_a_persona_infectada = (Frecuencia_de_picada*Probabilidad_de_contagio_por_succión*(Personas_infectadas_en_fase_aguda+Personas_infectadas_en_fase_cronica))/12
OUTFLOWS:
Muerte_de_infectados_por_rociamiento = (Tasa_de_efectividad_del_rociamiento*Insectos_triatominos_infectados)/12
Muerte_natural_de_insectos_infectados = (0.4*Insectos_triatominos_infectados)/12

Insectos_triatominos_susceptibles(t) = Insectos_triatominos_susceptibles(t - dt) + (Nacimiento_de_insectos - Picada_de_insecto_triatomino_a_persona_infectada - Muerte_de_susceptibles_por_rociamiento - Muerte_natural_de_insectos_susceptibles) * dt
INIT Insectos_triatominos_susceptibles = 157649*10
INFLOWS:
Nacimiento_de_insectos = (0.4*(1-Mejora_en_la_calidad_de_hogar)*Insectos_triatominos_susceptibles)/12
OUTFLOWS:
Picada_de_insecto_triatomino_a_persona_infectada = (Frecuencia_de_picada*Probabilidad_de_contagio_por_succión*(Personas_infectadas_en_fase_aguda+Personas_infectadas_en_fase_cronica))/12
Muerte_de_susceptibles_por_rociamiento = (Tasa_de_efectividad_del_rociamiento*Insectos_triatominos_susceptibles)/12
Muerte_natural_de_insectos_susceptibles = (0.4*Insectos_triatominos_susceptibles)/12

Personas_infectadas_en_fase_aguda(t) = Personas_infectadas_en_fase_aguda(t - dt) + (Picada_de_insecto_triatomino_infectado - Evolución_de_la_enfermedad - Recuperación_por_medicamento - Muerte_por_enfermedad_en_fase_aguda) * dt
INIT Personas_infectadas_en_fase_aguda = 0
INFLOWS:
Picada_de_insecto_triatomino_infectado = (Insectos_triatominos_infectados*Frecuencia_de_picada*Probabilidad_de_contagio_por_picada)/12
OUTFLOWS:
Evolución_de_la_enfermedad = ((1/3)*Personas_infectadas_en_fase_aguda)
Recuperación_por_medicamento = Tasa_de_recuperación_efectiva*Personas_infectadas_en_fase_aguda
Muerte_por_enfermedad_en_fase_aguda = (0.15*Personas_infectadas_en_fase_aguda)/12

Personas_infectadas_en_fase_cronica(t) = Personas_infectadas_en_fase_cronica(t - dt) + (Evolución_de_la_enfermedad + Nacimiento_de_niños_infectados - Muerte_por_enfermedad_en_fase_crónica - Muerte_natural_de_personas_infectadas) * dt

INIT Personas_infectadas_en_fase_cronica = 0

INFLOWS:

- Evolución_de_la_enfermedad = ((1/3)*Personas_infectadas_en_fase_aguda)
- Nacimiento_de_niños_infectados = ((Tasa_de_nacimientos_infectados*0.014)*Personas_infectadas_en_fase_cronica)/12

OUTFLOWS:

- Muerte_por_enfermedad_en_fase_crónica = ((0.35/25)*Personas_infectadas_en_fase_cronica)/12
- Muerte_natural_de_personas_infectadas = (0*0.014*Personas_infectadas_en_fase_cronica)/12

Personas_susceptibles(t) = Personas_susceptibles(t - dt) + (Nacimiento_personas_susceptibles + Recuperación_por_medicamento - Muerte_natural_de_personas_susceptibles - Picada_de_insecto_triatomino_infectado) * dt

INIT Personas_susceptibles = 157649

INFLOWS:

- Nacimiento_personas_susceptibles = (0.014*Personas_susceptibles)/12
- Recuperación_por_medicamento = Tasa_de_recuperación_efectiva*Personas_infectadas_en_fase_aguda

OUTFLOWS:

- Muerte_natural_de_personas_susceptibles = (0.014*Personas_susceptibles)/12
- Picada_de_insecto_triatomino_infectado = (Insectos_triatominos_infectados*Frecuencia_de_picada*Probabilidad_de_contagio_por_picada)/12

Frecuencia_de_picada = 36.5

Mejora_en_la_calidad_de_hogar = 0

Probabilidad_de_contagio_por_picada = 1e-3

Probabilidad_de_contagio_por_succión = 1e-2

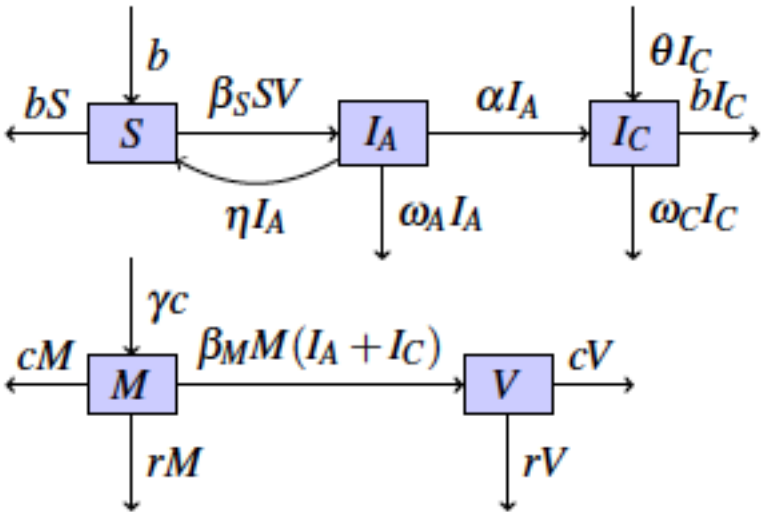
Tasa_de_efectividad_del_rociamiento = 0

Tasa_de_nacimientos_infectados = 0

Tasa_de_recuperación_efectiva = 0

II. APÉNDICE B
Cálculo Matriz de la Próxima Generación

Para comenzar, el modelo desde el cual se va a calcular la matriz de la próxima generación es el mismo de la gráfica 7:



donde se manejan las notaciones presentadas a continuación.

Variable	Nombre
S	Humano susceptible.
I_A	Humano infectado en fase aguda.
I_C	Humano infectado en fase crónica.
M	Insecto triatomino susceptible.
V	Insecto triatomino infectado.
b	Nacimiento-muerte natural de personas.
β_S	Probabilidad de infección de vector a humano.
β_M	Probabilidad de infección de humano a vector.
η	Recuperación por medicamento.
α	Transición de fase aguda a fase crónica.
ω_A	Muerte por fase aguda.
ω_C	Muerte por fase crónica.
θ	Transición de madre a hijo humano.
c	Nacimiento-muerte natural del insecto triatomino.
γ	Efecto de la calidad de vivienda sobre el nacimiento de vectores susceptibles.
r	Muerte por rociamiento.

Ahora bien, para el cálculo de la matriz se va a seguir el procedimiento descrito en *Acercamientos a la Epidemología de una Enfermedad a través de Sistemas Compartimentales* (Amaya, 2014).

Se comienza describiendo la transmisión en los compartimentos de infectados,

$$\mathbb{F}(I_A, I_C, V, S, M) = \begin{pmatrix} \beta_S SV \\ \alpha I_A + \theta I_C \\ \beta_M M(I_A + I_C) \end{pmatrix}.$$

Evaluando su derivada en el equilibrio libre de enfermedad $x_0 = (0,0,0, S_0, M_0)$, se obtiene

$$D\mathbb{F}(x_0) = \mathcal{F} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \beta_S S_0 \\ \alpha & \theta & 0 \\ \beta_M M_0 & \beta_M M_0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Continuando ahora con la transmisión en los compartimentos no infectados,

$$\mathbb{V}^+(I_A, I_C, V, S, M) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbb{V}^-(I_A, I_C, V, S, M) = \begin{pmatrix} (\omega_A + \eta\alpha) I_A \\ (\omega_C + b) I_C \\ (r + c) V \end{pmatrix},$$

$$\mathbb{V}(I_A, I_C, V, S, M) = \mathbb{V}^- - \mathbb{V}^+ = \begin{pmatrix} (\omega_A + \eta\alpha) I_A \\ (\omega_C + b) I_C \\ (r + c) V \end{pmatrix}.$$

Evaluando su derivada en el equilibrio libre de enfermedad $x_0 = (0,0,0, S_0, M_0)$, se obtiene

$$D\mathbb{V}(x_0) = \mathcal{V} = \begin{pmatrix} \omega_A + \eta\alpha & 0 & 0 \\ 0 & \omega_C + b & 0 \\ 0 & 0 & r + c \end{pmatrix}, \text{ entonces}$$

$$\mathcal{V}^{-1} = \begin{pmatrix} (\omega_A + \eta\alpha)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & (\omega_C + b)^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & (r + c)^{-1} \end{pmatrix}.$$

Finalmente, se halla la matriz de la próxima generación

$$\mathcal{G} = \mathcal{F}\mathcal{V}^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{\beta_S S}{r+c} \\ \frac{\alpha}{\omega_A + \eta + \alpha} & \frac{\eta}{\omega_C + b} & 0 \\ \frac{\beta_M M}{\omega_A + \eta + \alpha} & \frac{\beta_M M}{\omega_C + b} & 0 \end{pmatrix}.$$

III. APÉNDICE C
Cálculo de Virulencia

De nuevo, se siguen los pasos explicados en *Acercamientos a la Epidemología de una Enfermedad a través de Sistemas Compartimentales* (Amaya, 2014).

Primero se hallan los circuitos del sistema asumiendo como equilibrio libre de enfermedad al vector $x_0 = (0,0,0,1,1)$,

$\Gamma_1(\mathcal{G}) = \frac{\beta_S}{r+c} \cdot \frac{\beta_M}{\omega_C+b} \cdot \frac{\alpha}{\omega_A+\eta+\alpha}$

$\Gamma_2(\mathcal{G}) = \frac{\beta_S}{r+c} \cdot \frac{\beta_M}{\omega_A+\eta+\alpha}$

$\Gamma_3(\mathcal{G}) = \frac{\theta}{\omega_C+b}$.

Al mismo tiempo se calcula el mayor valor propio de la siguiente matriz que se obtiene a partir de la matriz de la próxima generación ($\mathcal{G}$),

$$\mathcal{S}(\mathcal{G}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Dicho valor propio resulta ser $\lambda_{max} = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$.

Si se define ahora $\mathcal{H}$ como $\mathcal{H} = max\left\{\frac{\theta}{\omega_C+b}, \sqrt{\frac{\beta_S}{r+c} \cdot \frac{\beta_M}{\omega_A+\eta+\alpha}}, \sqrt[3]{\frac{\beta_S}{r+c} \cdot \frac{\beta_M}{\omega_C+b} \cdot \frac{\alpha}{\omega_A+\eta+\alpha}}\right\}$, entonces
$\mathcal{H} \leq \mathcal{R}_0 \leq \frac{1+\sqrt{5}}{2}\mathcal{H}$, por lo tanto bastaría con conocer el valor de $\mathcal{H}$.

Primero se quiere saber cuál es más grande entre el ciclo 1 y el ciclo 2, para esto, comience observando que $\sqrt[3]{\frac{\beta_S}{r+c} \cdot \frac{\beta_M}{\omega_C+b} \cdot \frac{\alpha}{\omega_A+\eta+\alpha}} = \sqrt[3]{\frac{\beta_S}{r+c} \cdot \frac{\beta_M}{\omega_A+\eta+\alpha} \cdot \frac{\alpha}{\omega_C+b}}$ y que $\sqrt{\frac{\beta_S}{r+c} \cdot \frac{\beta_M}{\omega_A+\eta+\alpha}} = \sqrt[3]{\frac{\beta_S}{r+c} \cdot \frac{\beta_M}{\omega_A+\eta+\alpha}} \cdot \sqrt[6]{\frac{\beta_S}{r+c} \cdot \frac{\beta_M}{\omega_A+\eta+\alpha}}$.

Entonces el ciclo 2 se puede reescribir como $\sqrt[3]{\frac{\beta_S}{r+c} \cdot \frac{\beta_M}{\omega_A+\eta+\alpha}} \cdot \sqrt[6]{\frac{\beta_S}{r+c} \cdot \frac{\beta_M}{\omega_A+\eta+\alpha}}$ y el ciclo 1 se puede reescribir como $\sqrt[3]{\frac{\beta_S}{r+c} \cdot \frac{\beta_M}{\omega_A+\eta+\alpha}} \sqrt[3]{\frac{\alpha}{\omega_C+b}}$. Por lo tanto, para saber cuál de los dos es mayor, basta con conocer los valores de $\sqrt[6]{\frac{\beta_S}{r+c} \cdot \frac{\beta_M}{\omega_A+\eta+\alpha}}$ para el ciclo 2 y de $\sqrt[3]{\frac{\alpha}{\omega_C+b}}$ para el ciclo 1.

Así, el problema se reduce a conocer cuál es mayor entre $\sqrt[6]{\frac{\beta_S}{r+c} \cdot \frac{\beta_M}{\omega_A+\eta+\alpha}}$ y $\sqrt[3]{\frac{\alpha}{\omega_C+b}}$. Para esto asuma los mayores valores posibles para r y η, los cuales serían $r = 1, \eta = 1$. Además, recuerde que los demás valores serían

Constante	Valor
β_S	$36.5 * 10^{-3}$
β_M	$36.5 * 10^{-2}$
ω_A	0.15
ω_C	0.35
c	0.5
α	15
b	0.014

Realizando el debido reemplazo se encuentra que el ciclo 2 presenta un valor de 3.45 mientras que el ciclo 1 presenta un valor de 0.29. Haciendo del ciclo 2 el mayor entre los dos.

Finalmente se comparan el ciclo 2 con el ciclo 3. Para esto, suponga también que θ asume el mayor valor posible, esto sería $\theta = 1$. Realizando entonces el debido reemplazo de las cantidades se obtiene que ciclo 3 tiene un valor de 2.75, haciéndolo menor al ciclo 2. Es entonces el ciclo 2 el vencedor y el valor para $\mathcal{H}$. Esto es,

$$\mathcal{H} = \sqrt{\frac{\beta_S}{r+c} \cdot \frac{\beta_M}{\omega_A+\eta+\alpha}}.$$

IV. APÉNDICE D
Cálculo de valores endémicos

Para el cálculo de los valores endémicos, se usará los resultados presentados en *Dynamical behaviour of a vector-host epidemic model with demographic structure* (Qiu, 2008). Se mantendrá la notación manejada en el documento de Qiu.

Elemento	Definición	Valor
T^c	Proporción de la población de vectores que es susceptible.	1
N^c	Proporción de la población de huéspedes que es susceptible.	1
b	Cantidad de contactos entre vectores y huéspedes en un periodo de tiempo.	$36.5/12$
α	Probabilidad de contagio de huésped a vector.	10^{-2}
β	Probabilidad de contagio de vector a huésped.	10^{-3}
ε	Tasa de muerte natural del vector.	$0.5/12$
μ	Tasa de muerte natural del huésped.	$0.014/12$
d	Tasa de muerte del huésped por infección.	$0.15/3 + 0.35/15*12$
γ	Tasa de recuperación del infectado.	0

Con estos valores se calcula el resultado en equilibrio endémico de la proporción de cada una de las poblaciones: vectores infectados (V*); vectores susceptibles (M*); huéspedes infectados (I*) y huéspedes susceptibles (S*). A partir de las fórmulas a continuación:

$$V^* = \frac{b^2\beta\alpha T^c N^c - (\mu+\gamma)\varepsilon}{(b\alpha N^c + \varepsilon)b\beta} = 0.87$$

$$M^* = T^c - V^* = 0.13$$

$$I^* = \frac{\varepsilon V^*}{b\alpha(T^c - V^*)} = 0.96$$

$$S^* = N^c - I^* = 0.04$$