

**MODELO BASADO EN INDIVIDUOS Y SIMULADOR, DE DIFUSION
DE LA TUBERCULOSIS**



**ANGELA JOHANA MUÑOZ IDROBO
ANDRES FELIPE MENESES PAZ**

Trabajo de grado

Director: Ing. Juan Carlos Vidal Rojas

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES, DEPARTAMENTO DE SISTEMAS
POPAYAN, FEBRERO DE 2005**

CONTENIDO

1	MODELO BASADO EN INDIVIDUOS	7
1.1	AGENTES O INDIVIDUOS	7
1.2	AGENTES INTELIGENTES	9
1.3	SISTEMAS MULTIAGENTES	12
1.4	SISTEMAS, MODELOS Y SIMULACION	13
1.5	MODELOS BASADOS EN INDIVIDUOS O AGENTES	15
1.6	ESTADO DEL ARTE DE LOS ENFOQUES Y MODELOS DE LAS DINAMICAS DE LA TUBERCULOSIS Y DE LOS SIMULADORES EXISTENTES PARA ESTOS MODELOS	18
1.6.1	ENFOQUES Y MODELOS	18
1.6.2	SIMULADORES	31
2	MODELO BASADO EN INDIVIDUOS DE DIFUSION DE LA TUBERCULOSIS	33
2.1	SISTEMA	33
2.2	MODELO	34
2.2.1	HABITANTE	34
2.2.2	AMBIENTE	46
2.2.3	INTERACCIONES	53
2.3	SIMULACIÓN	55
3	CAPTURA DE REQUERIMIENTOS Y ANALISIS DEL SIMULADOR DE DIFUSION DE LA TUBERCULOSIS	56
3.1	CAPTURA DE REQUERIMIENTOS	56
3.1.1	Propósito del sistema	56
3.1.2	Características del sistema	57
3.1.3	Modelo conceptual	57
3.1.4	Listado de funciones del sistema	60
3.1.5	Requisitos no funcionales	61
3.1.6	Modelo de casos de uso	61
3.2	MODELO DE ANALISIS	70
3.2.1	PAQUETES DE ANÁLISIS	70

4	HERRAMIENTAS TECNOLOGICAS EMPLEADAS PARA LA IMPLEMENTACION DEL SIMULADOR DE DIFUSION DE LA TUBERCULOSIS	72
4.1	TECNOLOGIA JAVA	72
4.2	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO BASADO EN INDIVIDUOS DE DIFUSIÓN DE LA TB72	73
4.2.1	SWARM	73
4.3	PERSISTENCIA DE DATOS	83
4.3.1	JDOM	83
4.4	VISUALIZACIÓN ESPACIAL DE LA SIMULACIÓN, EN UN MAPA GEOGRÁFICO	84
4.4.1	GEOTOOLS	87
4.5	ENTORNO DE DESARROLLO	88
5	EXPERIMENTOS PARA EL SIMULADOR DE DIFUSIÓN DE LA TUBERCULOSIS	90
6	CONCLUSIONES	116
7	RECOMENDACIONES	118

INTRODUCCIÓN

La tuberculosis fue declarada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como una emergencia global en 1993. Cada año se presentan 8 millones de casos nuevos y la muerte de aproximadamente 2 millones de personas en el mundo.

En Colombia constituye un grave problema de salud pública. Según la información del Ministerio de Salud, la tasa de incidencia venía en descenso desde 1970, cuando se reportaron 58.6 casos por 100.000 habitantes. En 1997 se describió una incidencia de 21.5 y un discreto incremento en el año 2000 a 27.4 casos por 100.000 habitantes. El Ministerio de Salud consideró que el descenso de la tasa de incidencia se debió a la disminución de la búsqueda de casos y al subregistro de los enfermos diagnosticados.

En el Municipio de Popayán, la tasa de incidencia venía en descenso desde 1990 hasta 1996, cuando se reportaron 9.9 casos por 100.000 habitantes, fenómeno atribuido a las mismas razones del orden nacional. En el año 2000, y gracias a una campaña de mayor búsqueda de pacientes, la tasa de incidencia se incrementó en 330%, alcanzando 32 casos por 100.000 habitantes. Además, los factores socioeconómicos predisponentes para el desarrollo de la enfermedad tales como: altas tasas de desempleo, pobreza extrema, desnutrición, hacinamiento, población desplazada en crecimiento y servicios médicos insuficientes, se combinan en nuestra región de manera preocupante y en general, en todos los países en vía de desarrollo.

Para evitar el aumento continuo de enfermos de tuberculosis en el futuro, se hace necesario llevar a cabo estrategias de prevención, tales como: búsquedas activas de sintomáticos, campañas educativas, campañas de vacunación, entre otras, en las zonas donde se presentará mayor prevalencia de tuberculosis.

Llevar a cabo estas estrategias de prevención es muy complejo ya que los médicos no tienen un medio para obtener información acerca de las zonas donde se presentará mayor prevalencia de tuberculosis y acerca del grupo o de los grupos de edad, dentro de una

zona de alta prevalencia, a los cuales deberían apuntar las estrategias. Sin este conocimiento las estrategias de prevención no se dirigen a zonas específicas y a grupos específicos, lo cual produce esfuerzos y costos enormes.

Entonces, ¿Cómo obtener información confiable acerca de las futuras zonas de mayor prevalencia y acerca del(os) grupo(s) de edad, dentro de dichas zonas, al(os) cual(es) deberían apuntar las estrategias de prevención?, esta pregunta fue la motivación para el desarrollo de este trabajo de grado.

A lo largo de esta monografía se explica como la simulación fundamentada en el Modelamiento Basado en Individuos, proporciona el soporte adecuado para encontrar la respuesta a la pregunta anteriormente planteada.

El objetivo general de este proyecto consistió en desarrollar una solución tecnológica que suministre información (desde el enfoque teórico y la experiencia del asesor especialista del proyecto), a los profesionales de la salud, acerca de las posibles futuras zonas de mayor prevalencia y acerca del(os) grupo(s) de edad que sería(n) más afectados, dentro de dichas zonas, para el diseño de estrategias de prevención de la tuberculosis, según el criterio de estos profesionales.

La solución tecnológica desarrollada es una aplicación que permite simular el modelo basado en individuos de difusión de la tuberculosis, concebido en este proyecto y explicado claramente en el capítulo 3 del presente documento.

Mediante las simulaciones que el usuario puede realizar con el simulador de difusión de tuberculosis, a partir de la ubicación de enfermos iniciales; en un mapa geográfico; el usuario podrá observar después de transcurrido el tiempo de simulación la difusión de la enfermedad debido a esos enfermos iniciales

A continuación explicaremos brevemente el contenido de cada uno de los capítulos que componen este documento

Capitulo 1: MODELO BASADO EN INDIVIDUOS. Este capitulo comienza con la breve definición de los términos agentes o individuos, sistemas multi-agentes, modelos y simulaciones, que a nuestro modo de ver, son bastantes relevantes para el entendimiento concreto de los modelos basados en individuos. Posteriormente se presenta el estado del arte de los enfoques y modelos de las dinámicas de la tuberculosis y de los simuladores existentes para estos modelos y en la última parte se expresan las consideraciones generales del Modelo basado en individuos de difusión de la tuberculosis, creado en este trabajo de grado.

Capitulo 2: MODELO BASADO EN INDIVIDUOS DE DIFUSION DE LA TUBERCULOSIS. Este capitulo busca hacer claro el entendimiento del modelo basado en individuos de difusión de la tuberculosis, de acuerdo a los conceptos brindados en el capitulo anterior; por lo tanto se empieza definiendo el sistema modelado, posteriormente se explica el modelo y sus componentes y por último se habla sobre el objetivo de la simulación de dicho modelo.

Capitulo 3: CAPTURA DE REQUERIMIENTOS Y ANALISIS DEL SIMULADOR DE DIFUSION DE LA TUBERCULOSIS. Este capitulo plasmará parte del proceso de desarrollo de la aplicación mostrando los artefactos básicos de soporte que esta etapa produce.

Capitulo 4: HERRAMIENTAS TECNOLOGICAS EMPLEADAS PARA LA IMPLEMENTACION DEL SIMULADOR DE DIFUSION DE LA TUBERCULOSIS. En este capitulo se hablará de las herramientas tecnológicas que hacen parte del simulador SWARM, GeoTools y Jdom.

Capitulo 5: EXPERIMENTOS PARA EL SIMULADOR DE DIFUSION DE LA TUBERCULOSIS. En este capitulo se presentará el diseño de los experimentos realizados con el simulador de difusión de tuberculosis y el análisis de los resultados obtenidos.

Por ultimo se presentan las conclusiones de este trabajo de grado.

1 MODELO BASADO EN INDIVIDUOS

El presente capítulo comienza con la breve definición de los términos agentes o individuos, sistemas multi-agentes, modelos y simulaciones, que a nuestro modo de ver, son bastantes relevantes para el entendimiento concreto de los modelos basados en individuos.

1.1 AGENTES O INDIVIDUOS

El término agente hasta el momento no tiene una definición universal aceptada, de hecho es un buen tema de debate y controversia abordado por los estudiosos de agentes. Esencialmente, mientras haya un consenso general de la importancia del concepto *autonomía* en la noción de agentes, se pueden conseguir acuerdos sobre este tópico. Una dificultad al definir concretamente el término agente es que los atributos que un agente puede tener, adquieren diferente importancia en distintos dominios o contextos, así para algunas aplicaciones, la habilidad de los agentes para aprender a partir de sus experiencias es de máxima importancia, como para otras aplicaciones el aprendizaje no es importante, a tal punto de ser indeseado.

No obstante, una cierta clase de definición es elemental, de lo contrario, existe el riesgo que el término pierda todo su significado. Por lo tanto, se puede considerar a *un agente como un sistema computacional situado en un ambiente, capaz de realizar acciones autónomas en este ambiente con el fin de cumplir sus objetivos de diseño*; ya que se ha postulado una de las tantas definiciones de agentes, ahora veamos el sentido que la palabra autonomía ofrece a los agentes. El término autonomía es usado para dar a entender que los agentes son capaces de actuar sin intervención de personas o de otros sistemas, es decir que tienen el control sobre su estado interno como también de su propio comportamiento.

Hay que tener en cuenta que la definición anterior enmarca únicamente a los “agentes” y no a los “agentes inteligentes”, posteriormente se mencionará el tema de “agentes inteligentes”.

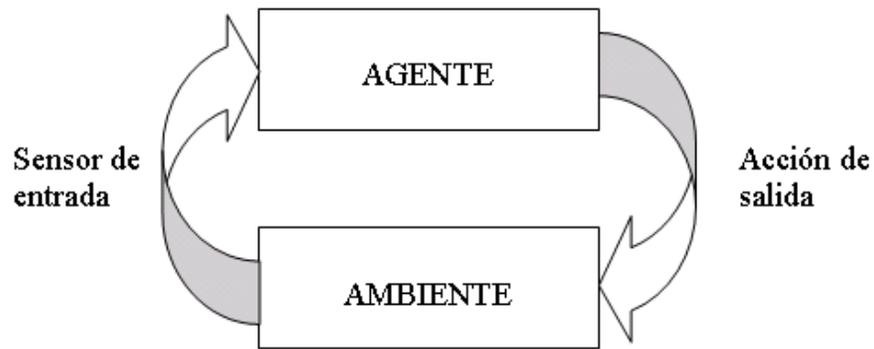


Fig. 1. Un agente y su ambiente. El agente toma sus entradas del ambiente y las procesa produciendo acciones de salida que afectan a dicho ambiente.

La Fig. 1. muestra una abstracción, a alto nivel, de un agente; donde se observa la acción de salida que el agente produce con el fin de afectar su ambiente.

En la mayoría de los dominios medianamente complejos, un agente no tendrá un completo control sobre su ambiente. Este tendrá en el mejor de los casos, un control parcial sobre el mismo, ese control parcial le dá al agente únicamente la habilidad de influir en el medio, pero no controlarlo. Desde el enfoque del agente, significa que la misma acción ejecutada dos veces en circunstancias idénticas aparentemente, puede causar efectos completamente diferentes, lo que se puede considerar como una falla, cuando se quiere obtener un resultado deseado. Estos ambientes *son conocidos como ambientes no determinísticos*.

Generalmente, un agente tendrá un repertorio de acciones disponibles, ese conjunto de posibles acciones representa la *capacidad de efecto* de los agentes, es decir, la habilidad de los agentes para modificar su ambiente. Pero no todas las acciones pueden ser ejecutadas en todas las situaciones, por lo tanto las acciones tienen asociadas *precondiciones* a cada una de ellas, las cuales definen las posibles situaciones en las que

las acciones pueden ser aplicadas. Las precondiciones consisten en eventos que ocurren en el ambiente y/o el estado de variables internas del agente.

El principal problema al que se enfrentan los agentes es el decidir cual de sus acciones deberá ejecutar para satisfacer, de la mejor forma, sus objetivos de diseño. La complejidad de los procesos de toma de decisiones puede estar afectada por un número de propiedades ambientales diferentes. Algunas de las propiedades ambientales son: accesibilidad / inaccesibilidad, determinismo / no determinismo, episódico / no episódico, estáticos / dinámicos, discreto / continuo entre otras. La mayoría de ambientes complejos son inaccesibles, no determinísticos, no episódicos, dinámicos y continuos.

En conclusión, los agentes son sistemas computacionales que son capaces de realizar acciones autónomas en algún ambiente con el fin de cumplir sus objetivos de diseño. Un agente normalmente percibirá su ambiente por medio de *sensores* físicos en el caso que el agente este ubicado en una parte del mundo real, o por *sensores* software en el caso que sea un agente en un ambiente software y tendrá un conjunto de *acciones* que pueden ser ejecutadas para modificar su ambiente.

1.2 AGENTES INTELIGENTES

Hasta el momento se ha buscado aclarar el concepto de agente, pero a medida que se avanza sobre esta temática, nacen más dudas, como, cuándo un agente es considerado inteligente y que es inteligencia; dar respuesta a estas preguntas en el contexto de los agentes se puede prestar para confusiones y divagaciones, para el propósito de esta sección se optó por la siguiente definición para agentes inteligentes: “Un agente inteligente es aquel que es capaz de realizar acciones autónomas *flexibles* con el fin de alcanzar sus objetivos de diseño”. En la anterior sección ya se había esclarecido la idea de autonomía, por consiguiente se explicará en que consiste el término flexibilidad. La flexibilidad en el campo de los agentes inteligentes abarca las siguientes tres definiciones:

Reactividad: Los agentes inteligentes son capaces de *percibir* su ambiente y *responder* de manera oportuna a los cambios que ocurren en el con el fin de alcanzar sus objetivos de diseño.

Proactividad: Los agentes inteligentes son capaces de mostrar un *comportamiento orientado a objetivos* tomando la iniciativa en sus procesos con el fin de alcanzar sus objetivos de diseño.

Habilidad social: Los agentes inteligentes tienen la capacidad de *interactuar* con otros agentes (y posiblemente con humanos) para alcanzar sus objetivos de diseño.

Estas propiedades son en realidad más importantes de lo que pueden parecer en un principio, por lo tanto, se explicarán cada una de ellas a continuación.

Primero se considera la definición de *proactividad*, que es el comportamiento orientado a objetivos. No es muy difícil construir un sistema que presente un comportamiento orientado a objetivos. Habitualmente se hace cuando se escriben funciones en C, o se implementan métodos en java. Cuando se escribe un procedimiento orientado a objetivos, este es descrito por todas las variables y/o estados - suposiciones - que inicialmente un procedimiento encuentra al ejecutarse, lo que se conoce comúnmente como *precondiciones*, y el efecto que este procedimiento alcanza si las suposiciones son válidas, son las *postcondiciones*.

Los efectos de un procedimiento son sus objetivos, en otras palabras, es lo que el programador o el autor del software intenta que el procedimiento realice. Si la precondición se mantiene durante la invocación del procedimiento, se espera, por lo tanto, que el procedimiento se ejecute correctamente, lo que implica que el procedimiento termine y al revisar en ese momento el resultado de la ejecución del procedimiento, la postcondición debe ser cierta, y el objetivo habrá sido alcanzado. Concluyendo, el *comportamiento orientado a objetivos* es simplemente un plan o una fórmula para alcanzar los objetivos. Este modelo de programación es apropiado para ser usado en una variedad de ambientes. Por ejemplo puede ser usado en sistemas funcionales que son aquellos que simplemente toman alguna entrada x , y producen como salida alguna función $f(x)$ de

su entrada, los compiladores son un ejemplo clásico de sistemas funcionales. Particularmente, este *modelo de programación orientado a objetivos* asume que el ambiente no cambia mientras un procedimiento se esta ejecutando. Si el ambiente cambia, y en particular, si las suposiciones (precondiciones) en las que se basa el procedimiento se tornan falsas mientras el procedimiento se esta ejecutando, entonces el comportamiento del procedimiento no puede ser definido, causando que el procedimiento falle. Además, como se asume que el objetivo es la razón de ejecución para que un proceso permanezca valido al menos hasta que el procedimiento termine, y si este objetivo no permanece valido durante y hasta el final del procedimiento, simplemente no hay razones para continuar con la ejecución del procedimiento.

A menudo se encuentran numerosos ambientes en los que las suposiciones no son válidas. En particular, en los dominios que son demasiado complejos para que un agente lo observe completamente, conocidos como dominios multi agentes (poblados por más de un agente que pueden cambiar el ambiente), o donde existe incertidumbre en el ambiente, las suposiciones (precondiciones) no tienen sentido. En tales ambientes, la ejecución de un procedimiento, que no estime si las suposiciones que lo fundamentan sean validas, no es aconsejable. En tales ambientes dinámicos, un agente debe ser *reactivo*, es decir, el agente debe ser sensible a los eventos que ocurren en su ambiente, donde esos eventos afectan a los objetivos de los agentes o a las suposiciones que apuntalan los procedimientos que el agente esta ejecutando con el fin de alcanzar sus objetivos.

Como ya se ha visto, la construcción de sistemas orientados a objetivos puros no es difícil, ni tampoco la construcción de sistemas reactivos puros que responden continuamente a su ambiente. Sin embargo, lo que resulta difícil de construir es un sistema que consiga un balance entre un comportamiento orientado a objetivos y un comportamiento reactivo. Siendo necesario que los agentes intenten conseguir sus objetivos sistemáticamente, quizás haciendo uso de un patrón similar al de procedimiento pero más complejo de acciones. Debido a lo expresado anteriormente, la integración efectiva del comportamiento orientado a objetivos y el comportamiento reactivo es uno de los problemas claves que enfrenta el diseñador de un agente. En la actualidad existen proyectos con el fin de crear agentes que tengan este balance adecuado, aunque el problema esta esencialmente abierto.

Finalmente, la habilidad social en cierto sentido puede ser vista como una definición trivial, ya que, cada día, millones de computadores a través del mundo ordinariamente intercambian información con humanos y otros computadores. Pero la habilidad de intercambiar flujos de bits no es realmente una habilidad social. Considerando el mundo de los humanos, comparativamente, pocos de los principales objetivos de las personas pueden ser logrados sin la cooperación de otras, quienes no comparten los objetivos de los demás, en otras palabras, las personas son autónomas, con su propia agenda de propósitos a conseguir. Entonces, para conseguir los objetivos que cada quien tiene, las personas deben negociar y cooperar con las demás. Las personas pueden entender y razonar sobre los objetivos de otras y ejecutar acciones que de otra manera no escogerían ejecutar, con el fin de que esas otras personas cooperen con ellas y así puedan alcanzar sus objetivos. Este tipo de habilidad social es mucho más compleja, y poco entendida, que simplemente la habilidad de intercambiar información binaria de la que se habló anteriormente.

1.3 SISTEMAS MULTIAGENTES

Los *agentes* operan y existen en algún *ambiente*, estos ambientes pueden ser computacionales o físicos y pueden tener uno o más agentes. Aunque existen situaciones donde un agente puede operar adecuadamente solo, el incremento de las interconexiones y el networking de los computadores y el creciente interés en ambientes virtuales que buscan analizar el comportamiento global de situaciones del mundo real, hace tal situación bastante inusual. En consecuencia, cuando el número de agentes es demasiado grande no es tan conveniente tratar con ellos individualmente, es mas conveniente tratarlos colectivamente, como una sociedad de agentes.

La diferencia entre los sistemas multiagentes y los sistemas de un solo agente es que en los sistemas multiagentes los agentes coexisten con los modelos de acciones y objetivos de los demás agentes. En un escenario multiagente, los agentes pueden *interactuar* directamente con otro agente; las *interacciones* pueden ser consideradas como estímulos

del ambiente, o comunicaciones entre agentes desde ambientes separados y probablemente diferentes.

Los sistemas multiagentes buscan lograr la cooperación de un conjunto de agentes autónomos para la realización de una tarea.

1.4 SISTEMAS, MODELOS Y SIMULACION

Un *sistema* se define como una colección de entidades (por ejemplo, personas, máquinas, agentes, objetos,...) que actúan e interactúan juntas para lograr un fin común. En la práctica lo que se entiende por sistema depende de los objetivos del estudio particular que se pretende hacer. El conjunto de entidades que componen el sistema para un estudio puede ser sólo un conjunto de todas las entidades utilizadas para otro estudio.

Los sistemas se pueden clasificar en dos tipos, discretos y continuos. Un sistema discreto es aquel en el que las variables de estado cambian instantáneamente en puntos separados en el tiempo. Un sistema continuo es aquel en el que las variables de estado cambian continuamente con respecto al tiempo. En la práctica muchos sistemas no son completamente discretos o continuos, usualmente es posible clasificarlos en base al tipo de cambios que predominen en el mismo, si son mas discretos que continuos o viceversa.

En algunos momentos, en la vida de un sistema es necesario estudiar el mismo para entender las relaciones entre sus componentes o predecir su comportamiento bajo nuevas condiciones que se consideren. En estos casos el sistema puede ser estudiado por medio de *simulaciones* de un modelo concebido a partir del sistema, en breve se explicará la definición del término modelo.

Podemos definir la *simulación* como “la técnica de resolución de problemas siguiendo en el tiempo los cambios de un modelo de un sistema”, o como “el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con dicho modelo con el propósito de comprender el funcionamiento del sistema o de evaluar diferentes estrategias para la operación del sistema, para el autor de esta última definición, simulación incluye tanto la

modelización como el uso del modelo para estudiar el sistema. Otra posible definición es entender la simulación como “el proceso de diseñar un modelo matemático o lógico de un sistema real y realizar una serie de experimentos con el ordenador sobre él, para describir, explicar y predecir el comportamiento del sistema real”.

Un *modelo* es la representación de un sistema, desarrollado con el propósito de estudiar dicho sistema. Los modelos deben contener sólo los aspectos esenciales del sistema real que representan. Aquellos aspectos del sistema que no contribuyen significativamente en su comportamiento no se deben incluir, ya que obscurecen las relaciones entre las entradas y las salidas.

Los modelos deberían presentar las siguientes características:

- Deben ser fáciles de entender y manejar.
- Deben ser simples y de costo no excesivo.
- Deben ser una buena aproximación del sistema real, que controle el mayor número posible de aspectos del mismo y que éstos contribuyan de forma significativa al sistema (hay relaciones en el sistema que no son significativas y pueden obviarse en el modelo).

El diseño y control de modelos computacionales se enmarcan en cuatro áreas de conocimiento distintas:

- Modelización: consiste en el diseño de un modelo que permita dar respuestas válidas del sistema real que represente. El diseño es una fase muy importante, ya que los errores en esta etapa proporcionarán modelos falsos.
- Programación: ya que el modelo se implementa por medio de un lenguaje de programación.
- Probabilidad y Estadística: la probabilidad es necesaria para definir y estudiar las variables aleatorias de las entradas, y la estadística para permitir el diseño y análisis de los experimentos.
- Métodos heurísticos: permiten llegar a una adecuada solución del problema planteado.

Las simulaciones pueden ser aplicadas en diferentes campos, tales campos planteados son:

Experimentación: Hay dos situaciones que requieren un modelo, cuando la experimentación directa sobre el sistema real es muy costosa o imposible y cuando se proyecta diseñar un nuevo sistema. Con la experimentación, el modelo se puede ir modificando fácilmente hasta obtener el comportamiento deseado.

Predicción: El modelo se puede usar para predecir el comportamiento del objeto real bajo ciertos estímulos. Se puede hacer así una evaluación de diferentes estrategias o ambientes de acción.

Enseñanza y entrenamiento: Se puede utilizar para el adiestramiento de diferentes situaciones antes de enfrentarse a las reales, como es el caso del entrenamiento de astronautas.

1.5 MODELOS BASADOS EN INDIVIDUOS O AGENTES

Hasta el momento, con los conceptos dispuestos en las secciones anteriores, se tienen las herramientas necesarias para entender o asimilar de una manera sencilla, el tema central de este capítulo.

Al revisar la unidad de este capítulo titulada sistemas multi agentes, implícitamente el lector tiene la oportunidad de encontrar términos de suma importancia que dan sentido a la definición de sistemas multi agentes, y que también están comprendidos en el ámbito de los modelos basados en individuos, tales términos son: agentes, ambientes e interacciones. A pesar de estas semejanzas, los sistemas multi agentes y los modelos basados en individuos difieren en su finalidad:

Los sistemas multi agentes buscan lograr la cooperación de un conjunto de agentes autónomos para que realicen una tarea, es decir, los sistemas multi agentes se pueden ver como una organización conformada por agentes, donde cada agente puede tener uno

o mas roles dentro de esta organización e interactúa y coopera con los demás para alcanzar las diferentes tareas que el sistema tiene definidas, los modelos basados en individuos, en cambio, se centran únicamente en el comportamiento individual de los agentes, permitiendo observar el comportamiento emergente o sistémico de un grupo de agentes, con el fin de comprender el impacto de los comportamientos individuales sobre los fenómenos colectivos, en la situación donde no es posible explicar de manera deductiva la forma en la que estos comportamientos contribuyen al comportamiento global. Los modelos basados en individuos son una herramienta potente que permite atacar la complejidad de los sistemas. Los modelos basados en individuos también son conocidos como modelos basados en agentes o entidades, y como simulaciones basadas en agentes/entidades/individuos.

En un modelo basado en individuos, las características de cada uno de los individuos pueden variar y son seguidas a través del tiempo.

Un modelo basado en individuos esta compuesto de tres componentes:

- Agentes
- Reglas de comportamiento y de interacción
- El ambiente

A lo largo de las secciones precedentes se habían expresado diferentes características referentes a los agentes, estas también están presentes en el ámbito de los modelos basados en individuos, a continuación se nombran:

- Autonomía
- Movilidad
- Reactividad
- Flexibilidad
- Capacidad de aprender y evolucionar

Para seleccionar que tipo de agentes se emplearan en una simulación multi agente, es necesario tener una idea clara de cual es el objetivo que se va a alcanzar con la simulación.

Los comportamientos o las reglas de comportamiento de los agentes son proporcionados por personas especialistas en el fenómeno que se quiere simular.

El ambiente donde se ubican los individuos es el espacio topológico que le permite entablar comunicación con otro u otros agentes y también le permite percibir estímulos. El ambiente le proporciona a los agentes las restricciones y leyes globales, además proporciona la información contenida en el mismo y la información de los agentes ubicados en el ambiente.

Algunos modelos basados en individuos son además *evidentemente* espaciales, lo que significa que los individuos, dentro de su ambiente, son asociados con una localización en un espacio geométrico, ciertos modelos además muestran movilidad, donde los individuos pueden moverse a través del ambiente. Otros modelos basados en individuos no son evidentemente espaciales, por ejemplo la simulación de una red de computadores donde la localización podría ser irrelevante. Los modelos evidentemente espaciales pueden usar espacios continuos o discretos, de dos o tres dimensiones.

En conclusión, construir una simulación basada en agentes implica concebir:

- Un ambiente
- Agentes (con sus parámetros y sus reglas de comportamiento)
- Y las interacciones que pueden llevarse a cabo entre:
 - agentes y el ambiente
 - agentes

A continuación se presenta el estado del arte de los enfoques y modelos de las dinámicas de la tuberculosis y de los simuladores existentes para algunos de estos modelos, esta parte del capítulo puede ser muy interesante para los conocedores de modelos matemáticos de dinámicas de transmisión de enfermedades, sin embargo para lectores no muy interesados en modelos matemáticos, se aconseja pasar a la sección “Nuestro modelo” donde se presentan las consideraciones generales que tendrá en cuenta el “Modelo basado en individuos de difusión de la tuberculosis”, modelo detallado ampliamente en el capítulo 2.

1.6 ESTADO DEL ARTE DE LOS ENFOQUES Y MODELOS DE LAS DINAMICAS DE LA TUBERCULOSIS Y DE LOS SIMULADORES EXISTENTES PARA ESTOS MODELOS

1.6.1 ENFOQUES Y MODELOS

Las investigaciones relacionadas con la dinámica de difusión de la tuberculosis (TB), para el entendimiento, prevención y control de la enfermedad, se han desarrollado bajo distintos enfoques y han arrojado distintas representaciones o distintos *modelos* de dicha dinámica. A continuación se describen algunos de los enfoques y modelos más relevantes, para su mayor entendimiento se aconseja leer las referencias.

Modelo general de la TB

Los *modelos determinísticos* para la dinámica de transmisión de una enfermedad infecciosa usualmente, consideran homogénea a la población de estudio. En el modelo básico de la TB, la población esta dividida en 4 grupos: Susceptibles (S, sanos ó no infectados), Latentes (E, infectados pero no infecciosos), Infecciosos (I, con TB activa ó clínica ó simplemente denominados enfermos de TB) y Tratados (T); debido a la consideración de población homogénea, todos los habitantes de un grupo tienen el mismo riesgo de pasar a otro grupo determinado y además todos los individuos Infecciosos (I) tienen el mismo grado de infecciosidad y por lo tanto la misma capacidad para transmitir la enfermedad a Susceptibles (S).

Una persona no infectada (S) puede infectarse (E) debido a un contacto con un infeccioso (I) bacilífero¹, este cambio se representa en la Fig. 1 con el flujo de S a E. La progresión de latencia (E) a tuberculosis activa (I) es inusual, se estima que solo 5-10% de las personas infectadas de TB desarrollaran TB clínica, flujo de E a I. Los individuos infecciosos (I) pueden recibir tratamiento, flujo de I a T, y se asume que sanarán y no recaerán si el tratamiento ha sido aplicado correctamente.

¹ Enfermo de tuberculosis que esparce bacilos al toser o estornudar

Este modelo es descrito por ecuaciones diferenciales que muestran el cambio de cada grupo sobre el tiempo, en la Fig. 1. se observan las tasas que afectan a cada grupo, Λ es la tasa de nacimientos de la población, μ es la tasa de mortalidad, β_h es la tasa de transmisión, k es la tasa de progresión a la enfermedad o tuberculosis activa, d es la tasa de mortalidad debida a la TB y r es la tasa de tratamientos.

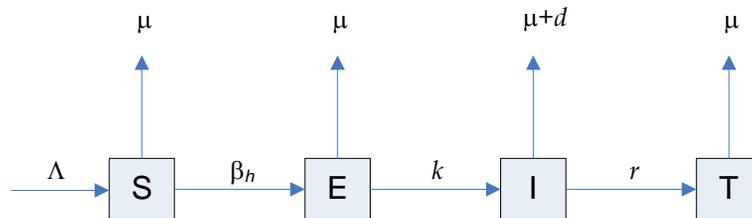


Fig. 1.1 Modelo general de la TB

Dinámica de difusión de la tuberculosis bajo el enfoque de los modos de transmisión

Una de las investigaciones desarrolladas bajo este enfoque, Transmisión y dinámica de tuberculosis en grupos humanos generalizados [1], estudia el modo de transmisión por contactos en clusters activos epidemiológicamente y el modo de transmisión por contactos casuales. Otra de las investigaciones bajo este enfoque, EpiCASim: un simulador de redes de autómatas aplicado a la propagación de epidemias (an autómata network simulator applied to the spread of epidemics) [2], centra su interés en dos modos de transmisión: modo de influencias locales y modo de influencias globales.

Transmisión y dinámica de tuberculosis en grupos humanos generalizados

Como resultado de esta investigación se obtuvo un modelo matemático de la dinámica de la enfermedad que considera la transmisión por contactos en un grupo humano o cluster activo (contactos cercanos y frecuentes) y la transmisión por contactos casuales. El concepto de grupo humano o cluster, se usa para referirse a un grupo de personas que experimentan contactos prolongados y diarios por ejemplo las personas del hogar, del lugar de trabajo, del colegio; un cluster activo epidemiológicamente es un cluster con

individuos infecciosos y un contacto casual es considerado como el contacto de un individuo infeccioso con personas que no pertenecen a su cluster.

En el modelo obtenido dividen a la población en 2 grupos: $N_c(t)$ individuos que pertenecen a clusters activos y $N_{nc}(t)$ individuos que no pertenecen a clusters activos. Dentro de $N_c(t)$ tienen 3 grupos de habitantes: S_1 , E_1 e I , dentro de $N_{nc}(t)$ tienen 2 grupos: S_2 , E_2 .

S , E , I corresponden a Susceptibles, Latentes e Infecciosos respectivamente. La clase o estado Tratado (T), se omite ya que su incorporación no produce diferencias significantes en la dinámica resultante, sin embargo en los apéndices del artículo de la investigación aparece un modelo con la inclusión de la clase T .

Por simplicidad para el modelo, los clusters no son seguidos a través del tiempo, solo se siguen las dinámicas o cambios de las poblaciones que componen a $N_c(t)$ y $N_{nc}(t)$. Se asume que cada cluster activo epidemiológicamente tiene solo un individuo infeccioso y ninguno de los individuos pertenece a más de un cluster activo epidemiológicamente.

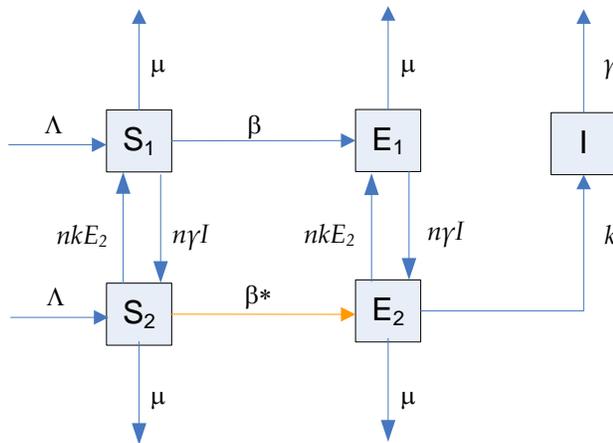


Fig. 1.2 Modelo de TB considerando contactos en cluster activos y contactos casuales

En un principio los contactos casuales son ignorados. Consideran una población donde la transmisión de la TB es conducida exclusivamente por la exposición prolongada y sistemática de susceptibles a individuos infecciosos. Por lo tanto, los susceptibles de un cluster activo epidemiológicamente (S_1) están en riesgo de infectarse de TB (E_1) exclusivamente debido a contactos cercanos y frecuentes con el individuo infeccioso (I)

perteneciente a dicho cluster, flujo de S_1 a E_1 de la Fig. 2., donde β es la tasa de transmisión de la TB en un cluster activo.

Cuando los individuos infectados latentemente (E_2) de la población $N_{nc}(t)$ desarrollan TB activa y se convierten en infecciosos (I) ellos se mueven junto con los miembros de sus clusters a la población $N_c(t)$. Inversamente, cuando un individuo infeccioso se recupera, este individuo regresa, con todos los miembros de su cluster, a la población $N_{nc}(t)$. Lo anterior se explica con mas detalles de la siguiente forma, k es la tasa de progresión a TB activa, así, hay kE_2 nuevos individuos infecciosos por unidad de tiempo, flujo de E_2 a I . n es el tamaño promedio de un cluster, entonces la tasa de cambio de la población no infecciosa que pertenece a clusters activos epidemiológicamente ($S_1 + E_1$) se aumenta en nkE_2 . Esta tasa es asignada a los componentes susceptible (S_1) y latente (E_1), flujos de S_2 a S_1 y de E_2 a E_1 . γ es la tasa total de eliminación de la clase infecciosa (I) entonces hay $n\gamma I$ personas saliendo de la población no infecciosa que pertenece a clusters activos ($S_1 + E_1$) por unidad de tiempo. Se asume que la proporción de susceptibles S_1 de $n\gamma I$ regresa a la clase susceptible S_2 y la proporción de latentes E_1 de la misma tasa regresa a E_2 , flujos de S_1 a S_2 y de E_1 a E_2 . γ se define como la suma de la tasa de mortalidad natural (μ), la tasa de mortalidad inducida por la enfermedad (d) y la tasa de tratamiento (r).

También se asume que el flujo constante de individuos susceptibles o tasa de natalidad (Λ) se distribuye proporcionalmente entre las poblaciones N_c y N_{nc} , entradas de S_1 y S_2 .

Al incluir en el modelo, la transmisión de TB debida a contactos casuales se asume que las infecciones casuales ocurren solo en la población N_{nc} ya que N_{nc} es mucho mayor que N_c . Las infecciones casuales se observan en la figura 2 con el flujo de S_2 a E_2 , donde β^* es la tasa de transmisión de TB debida a contactos casuales.

Según los autores del modelo, "antes de la existencia de los medios de transporte públicos masivos en grandes ciudades (buses atestados de personas, metros, grandes viajes) y la proliferación de lugares con altas concentraciones de gente (discotecas, conciertos, etc.) β^* tendía a cero. El surgimiento de nuevas dinámicas sociales debidas a la urbanización ha aumentado β^* y consecuentemente el incremento de casos de TB puede ser conducido por las infecciones casuales. Las infecciones casuales como las que

ocurren en los medios de transporte masivos pueden ser un componente clave en la re-emergencia de TB en las últimas décadas”.

EpiCASim: un simulador de redes de autómatas aplicado a la propagación de epidemias (an automata network simulator applied to the spread of epidemics)

Este trabajo tuvo como motivación, crear un paquete software que describiera acertadamente el comportamiento de las epidemias así como se observan en el mundo real. Desarrollaron un modelo de simulación basado en *autómatas celulares* probabilísticos que permite reproducir la interacción de dos modos de transmisión: influencias locales y globales. Así, la probabilidad de que un individuo susceptible (S) se convierta en un individuo infeccioso (I) es una superposición del modo local de transmisión, es decir los contactos físicos que cada individuo susceptible experimenta y de la influencia global, considerando que la transmisión de la enfermedad también depende del número total de individuos infecciosos o enfermos (I) en la población.

En este simulador se puede escoger uno de los siguientes modelos:

- SIR (Susceptible-Infeccioso-Recuperado)
- SIRS (Susceptible- Infeccioso -Recuperado-Susceptible)
- SITS (Susceptible- Infeccioso -Tratado-Susceptible)

En estos modelos se considera una población de N individuos, los cuales son distribuidos en una matriz de dimensiones $L \times L = N$. Cada posición de la matriz recibe tres atributos: una dirección espacial o posición de la matriz (i, j); un conjunto de estados posibles, por ejemplo S, I, R para especificar el estado clínico de la enfermedad de cada individuo y un periodo infeccioso que especifica durante cuantas unidades de tiempo un individuo infeccioso puede propagar la infección.

Estos modelos describen una epidemia como un sistema cerrado es decir sin tasa de nacimientos o migraciones. La propagación de la enfermedad en estos modelos esta gobernada por reglas, para el modelo SIR se aplican las siguientes reglas:

1. Cualquier individuo susceptible (S) puede llegar a ser infectado (distinto de I) con una probabilidad p_s . Un infectado llega a ser infeccioso (I) después de un tiempo promedio de latencia.
2. Los individuos infecciosos (I) son removidos del sistema determinísticamente (cuando llegan a ser inmunes) después de un periodo infeccioso que por simplicidad es considerado como constante para todos los individuos infecciosos.
3. Cuando los individuos pasan a la clase recuperada (R) participan pasivamente en la propagación de la infección (bloqueo eventual) por un periodo de inmunidad mayor al proceso epidémico completo.

Durante un paso de tiempo las tres reglas anteriores son aplicadas a todas las posiciones de la matriz.

La probabilidad p_s resulta de la superposición de las influencias locales y globales. Así, se asume que la transmisión de la enfermedad ocurre con una probabilidad p_s igual a:

$$p_s = \Gamma p_G + \Lambda p_L$$

donde los factores Γ y Λ son parámetros de peso para indicar la contribución que se le quiere dar al modo de transmisión global y local respectivamente. La influencia global p_G depende, en parte, del numero de individuos infecciosos (I) de la población en un tiempo determinado y de N el numero total de individuos de la población. El término local p_L es la probabilidad de que un individuo susceptible (S), localizado en una posición (i, j), contraiga la infección debido a n vecinos infecciosos ($0 \leq n \leq 8$). λ es la probabilidad, para un susceptible (S), de contraer la enfermedad cuando solo uno de sus vecinos es infeccioso (I), por lo tanto $(1 - \lambda)^n$ será la probabilidad de no contraer la enfermedad cuando se está expuesto a n infecciosos (I), así p_L es igual a:

$$p_L = 1 + (1 - \lambda)^n$$

El modelo es gobernado por p_s y su evolución temporal es determinada actualizando la matriz en cada paso de tiempo a través de la aplicación de las tres reglas mencionadas anteriormente.

El sistema software consiste de cuatro módulos: especificación, simulación, visualización y análisis. En el módulo de especificación una ventana de configuración permite al usuario la posibilidad de configurar los parámetros de cada modelo disponible, en la simulación y visualización se muestra al usuario una grilla o cuadrícula donde se representa la propagación de las epidemias con los parámetros definidos del modelo seleccionado y con el módulo de análisis el usuario puede observar resultados numéricos y gráficos de las dinámicas modeladas.

Dinámica de difusión de la tuberculosis bajo el enfoque de tuberculosis resistente a drogas

La tuberculosis resistente a drogas aparece como consecuencia de la inadecuada administración del tratamiento para un paciente. Dentro de este enfoque se ha desarrollado un modelo matemático: Modelo de TB que incluye dinámicas de transmisión de patógenos sensitivos a drogas y resistentes a drogas [3] y un modelo de autómatas celulares: Modelo de autómatas celulares para las dinámicas de transmisión de bacterias resistentes a antibióticos durante el estudio del estado del arte de los modelos de TB no se encontró información detallada sobre este modelo.

Modelo de TB que incluye dinámicas de transmisión de patógenos sensitivos a drogas y resistentes a drogas

El tratamiento para los pacientes con TB activa puede tener efectos contrarios, puede curar los casos sensitivos a drogas pero puede generar casos resistentes a drogas. Es un tratamiento con un régimen de drogas múltiples; el tratamiento es altamente efectivo (con una tasa de cura de 95%) si el paciente contiene organismos sensitivos a drogas y es estricto con el régimen de tratamiento. Sin embargo, la resistencia a drogas adquirida surge rápidamente en pacientes que reciben tratamientos inapropiados.

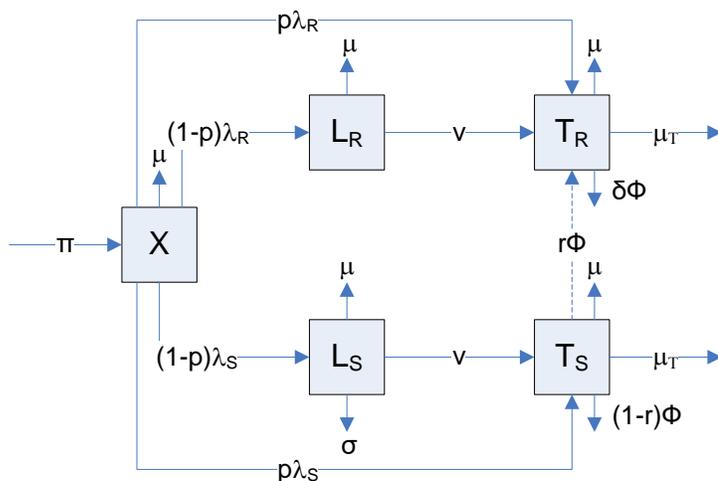


Fig. 1.3 Modelo de TB que incluye dinámicas de transmisión de patógenos sensibles a drogas y resistentes a drogas

La resistencia a drogas adquirida puede generar otros casos de resistencia (resistencia primaria) cuando un caso de resistencia a drogas adquirida infecta a un individuo susceptible. En el modelo, la TB resistente a drogas y sensible a drogas tienen sus propias dinámicas de transmisión, pero también están enlazadas porque un caso sensible a drogas puede ser transformado en un caso resistente a drogas cuando (por diferentes razones) el tratamiento no es supervisado correctamente y se desarrolla la resistencia adquirida.

En este modelo la población es dividida en 5 grupos: número de susceptibles o sanos (X), número de individuos infectados latentemente con TB sensible a drogas (L_S), número de individuos infectados latentemente con TB resistente a drogas (L_R), número de casos en tratamiento con TB sensible a drogas (T_S) y número de casos en tratamiento con TB resistente a drogas (T_R).

Los siguientes son los parámetros del modelo:

n tasa de llegada de nuevos susceptibles

p proporción de las nuevas infecciones que desarrollan la enfermedad dentro de un año

β_S coeficiente de transmisión de TB sensible a drogas

β_R coeficiente de transmisión de TB resistente a drogas

ν tasa de progresión a la enfermedad (para individuos infectados latentemente)

σ tasa de quimioprofilaxis efectiva.

μ tasa de mortalidad

Φ tasa de tratamientos

r probabilidad de surgimiento de resistencia a drogas durante el tratamiento

δ eficacia relativa de tratamiento en casos resistentes a drogas

μ_T tasa de mortalidad debida a TB

λ_S tasa de individuos infectados latentemente con TB sensitiva a drogas, $\lambda_S = \beta_S * T_S$

λ_R tasa de individuos infectados latentemente con TB resistente a drogas, $\lambda_R = \beta_R * T_R$

Según este modelo, algunos de los individuos susceptibles (X) son infectados de TB sensitiva a drogas de acuerdo a λ_S , una porción de estas nuevas infecciones se convierten en enfermedad en menos de un año, según ν , como lo muestra la Fig. 3. con el flujo de X a T_S ; los individuos de la porción restante de estas nuevas infecciones pasan al grupo de L_S , flujo de X a L_S ; algunos de los individuos de L_S desarrollarán la enfermedad según ν , flujo de L_S a T_S . Los flujos de X a T_R , X a L_R y L_R a T_R ocurren de manera similar pero los dos primeros están afectados por el factor λ_R . Los individuos de L_S pueden curarse gracias a quimioprofilaxis, esto se representa en la Figura. con el flujo de salida de L_S afectado por σ .

El modelo incluye la posibilidad que el tratamiento de casos sensitivos a drogas tenga tres posibles resultados: (a) el paciente puede curarse, salida de T_S con tasa igual $(1-r)\Phi$; (b) pueden ocurrir fallas en el tratamiento y el paciente adquiere TB resistente a drogas, flujo de T_S a T_R , o (c) pueden ocurrir fallas en el tratamiento pero el paciente permanece infectado con TB sensitiva a drogas. Para el tratamiento de casos resistentes a drogas, el modelo considera dos posibles resultados: (a) el paciente puede curarse, salida de T_R con tasa igual $\delta\Phi$; o (b) pueden ocurrir fallas en el tratamiento, el caso permanece en T_R .

Dinámica de difusión de la tuberculosis en poblaciones diferentes demográficamente

Bajo este enfoque se ha desarrollado un modelo matemático de TB para investigar los efectos de subpoblaciones susceptibles genéticamente y los efectos de los factores demográficos en las dinámicas de difusión de la tuberculosis en los diferentes países. En el artículo "Comparando epidemias de tuberculosis en poblaciones heterogéneas

diferentes demográficamente” [5] se describe este modelo. De acuerdo al artículo, los niveles de prevalencia de tuberculosis varían ampliamente entre países, los países presentan diferencias en la susceptibilidad genética hacia la tuberculosis de su población y además cada país tiene factores demográficos (tasa de nacimiento, tasa de mortalidad, hacinamiento, ambientes cerrados, nutrición, acceso a tratamiento médico) diferentes.

El modelo presenta los siguientes grupos de individuos: U no infectados, L infectados latentemente y T infectados activamente, subdividen cada uno de estos grupos para incluir a los individuos que presentan susceptibilidad genética, obteniendo seis grupos mutuamente exclusivos: U_N , L_N , T_N y U_S , L_S , T_S donde el subíndice N (neutral) identifica a los individuos sin susceptibilidad genética y S (susceptible) idéntica a los susceptibles genéticamente.

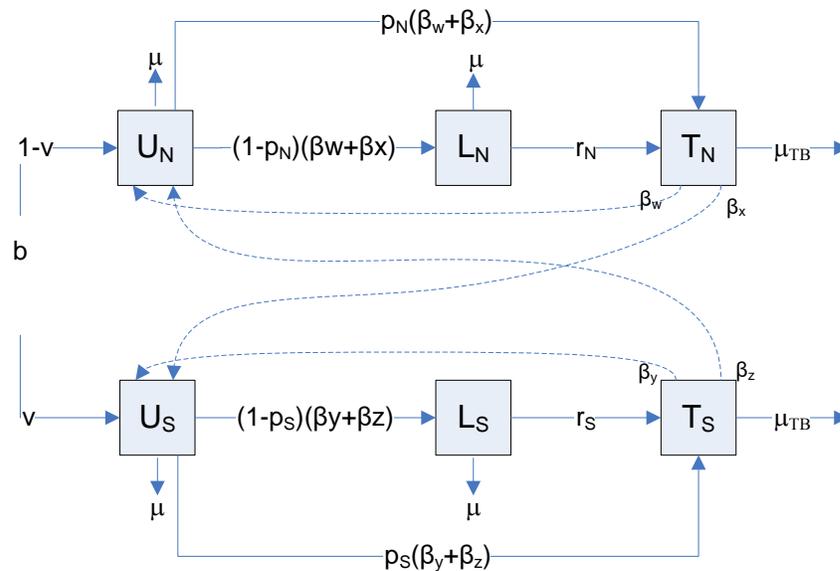


Fig.1.4 Modelo de TB que incluye poblaciones susceptibles y neutras genéticamente

Los nacimientos ocurren a una tasa b , con una fracción v que representa a los nuevos individuos susceptibles genéticamente a la infección. Las nuevas infecciones de TB dependen de las tasas de transmisión β_j ($j = w, x, y, z$), p_i y r_i ($i = N, S$) representan la progresión directa a TB activa y el desarrollo de la enfermedad en individuos infectados latentemente, respectivamente. μ representa la tasa de mortalidad y μ_{TB} la tasa de mortalidad debida a TB.

Según este modelo la transmisión de la TB ocurre cuando hay un contacto adecuado entre un individuo susceptible (U) y uno infeccioso (T); las tasas de contacto y transmisión dependen de condiciones específicas de los individuos y de condiciones ambientales. Las tasas de contacto pueden aumentar dependiendo de condiciones demográficas tales como la densidad de población y el hacinamiento, o de patrones sociales. Así asumen que las tasas de transmisión del modelo se determinan por el tamaño demográfico y por los tipos de subpoblaciones (N, S) del modelo. Usan cuatro tasas de transmisión cada una definida por β_w , β_x , β_y y β_z . Estas tasas representan los contactos, entre los individuos de los grupos, que pueden generar nuevas infecciones, como se observa en la Fig.4, por ejemplo β_w representa un contacto entre un individuo de U_N con un individuo de T_N . Asumen que $\beta_w \leq \beta_x \leq \beta_y \leq \beta_z$.

De acuerdo al modelo realizaron simulaciones de la distribución de prevalencia de la infección dentro de una población heterogénea genéticamente (susceptibles genéticamente y no susceptibles genéticamente) en 2 ambientes demográficos: India (población típica con alta prevalencia de tuberculosis) y USA (población con baja prevalencia). Los resultados mostraron que los cambios en la proporción de la población susceptible genéticamente a la infección y en los factores demográficos afectan fuertemente las tasas de prevalencia e incidencia de tuberculosis.

Nuestro modelo

El conocimiento de los enfoques y modelos descritos anteriormente nos permitió incluir algunas de sus características en nuestro modelo e identificar la necesidad de nuevas características.

Respecto al enfoque de los modos de transmisión, en nuestro modelo solo consideramos el modo de transmisión local o de contactos cercanos. Los contactos casuales tienen mucha relevancia en ciudades grandes con medios masivos de transporte, nuestro modelo omite la transmisión por contactos casuales pero puede ser una consideración para agregar en el modelo en un trabajo futuro. La experimentación realizada con el modelo consideró a la población de la ciudad de Popayán, una ciudad pequeña.

En la mayoría de países en vía de desarrollo el nivel de TB resistente a drogas es muy bajo, ya que no hay una alta detección de TB y por lo tanto la cobertura de tratamientos para personas enfermas es baja; el problema de la TB resistente a drogas es más crítico en países desarrollados, donde la mayoría de enfermos reciben tratamiento, por consiguiente, este enfoque aun no tiene gran impacto en nuestra región. En nuestro modelo consideramos la resistencia a drogas adquirida, es decir, la que se produce cuando se presentan fallas en el tratamiento de TB sensitiva a drogas, pero no se considera la transmisión de TB resistente a drogas, solo se trata la transmisión de TB sensitiva a drogas. Trabajos posteriores podrían incluir la dinámica de transmisión de TB resistente a drogas.

En el enfoque de la dinámica de difusión de la TB en poblaciones heterogéneas diferentes demográficamente, se considera la influencia de la susceptibilidad genética hacia la TB y la influencia de los factores demográficos en la dinámica de difusión de la TB de una población determinada. En los estudios realizados se ha supuesto el valor de cada país para el factor de susceptibilidad genética hacia la tuberculosis ya que por el momento no hay información acerca de este factor para los países y mucho menos para regiones más pequeñas, debido a esto la susceptibilidad genética no es tomada en cuenta para el modelo. Los estudios realizados bajo este enfoque muestran que los factores demográficos afectan la dinámica de difusión de la tuberculosis. Dentro de los factores demográficos se encuentran los factores socioeconómicos (desnutrición, hacinamiento, ambientes cerrados o condiciones habitacionales) que presentan un estado crítico en nuestra región, en general en Colombia y demás países en vía de desarrollo, por esta razón nuestro modelo, considera los efectos que producen algunos factores socioeconómicos en dichas dinámicas.

El modelo de TB creado presenta estados clínicos que no han sido considerados en los modelos de TB existentes. Los estados fueron definidos de acuerdo a los modelos existentes y a los referentes teóricos sobre la enfermedad de la TB, de acuerdo a la “Guía de atención de TB pulmonar y extra-pulmonar de Colombia” y al análisis realizado con la asesora temática, encargada del programa de tuberculosis de la Dirección Departamental de Salud del Cauca. Los estados definidos para un individuo son los siguientes: Sano, Infectado, Enfermo, Muerto, Tratado Contagioso, Tratado, Curado, Tratamiento

Terminado, Abandono, Fracaso y Resistente. Esta nueva definición de estados se acerca mas a la realidad de la TB en países en vía de desarrollo y a la terminología usada por el personal medico.

Para la realización del modelo de difusión de la tuberculosis no se optó por realizar un modelo matemático o un modelo basado en autómatas celulares ya que desde nuestro punto de vista presentan las debilidades que se describen a continuación. Los modelos matemáticos analizados trabajan con grupos de poblaciones homogéneas esto quiere decir que todos los habitantes de un grupo tienen el mismo riesgo de pasar a otro grupo determinado, de esta forma no es posible caracterizar a cada individuo con diversos factores que puedan influir para que el individuo pase de un grupo a otro. Además al evaluar modelos matemáticos, solo se obtienen valores numéricos para sus variables, por ejemplo: número de infectados; si las simulaciones de los modelos matemáticos se usan para proporcionar información para la elaboración de estrategias de prevención, los médicos solo obtendrán conocimiento numérico de los fenómenos, pero no podrán observar el comportamiento espacial de los mismos. Por esta razón se encuentra en las simulaciones de los modelos matemáticos limitantes para la elaboración de estrategias preventivas, ya que con ellas no es posible identificar zonas específicas para la realización de dichas estrategias.

Para el caso del modelo de autómatas celulares, los autómatas celulares son definidos como un conjunto de células de igual naturaleza, que poseen estados, y donde la transición entre los diferentes estados de cada célula depende de los estados de las células vecinas y el estado anterior de la misma célula. Los inconvenientes encontrados en los modelos de autómatas celulares, son no poder conformar una comunidad heterogénea (individuos de distinta naturaleza de un mismo grupo) y que los autómatas celulares no tienen ninguna relación con su entorno, solo se relacionan con los autómatas vecinos, situación que hace difícil crear un modelo de autómatas celulares que incluya los efectos de los factores socioeconómicos (entorno) en la difusión de la tuberculosis.

Por las restricciones nombradas anteriormente, para la realización del modelo de difusión de la tuberculosis se creó un modelo basado en individuos. Un modelo basado en individuos tiene como características esenciales: el manejo de individuos heterogéneos en

una comunidad, la interacción de cada uno de los individuos con su entorno, la creación de entornos semejantes a los reales y una de las características más relevantes para este proyecto, la visualización espacial del fenómeno simulado, aspecto que hace didáctico el entendimiento de los resultados y también brinda facilidades para la interacción con sistemas de visualización espacial, por ejemplo con un sistema de información geográfico.

1.6.2 SIMULADORES

En el enfoque de los modos de transmisión ya se menciona a EpiCASim: un simulador de redes de autómatas aplicado a la propagación de epidemias, este simulador como se indicó anteriormente puede hacer simulaciones con tres modelos pero ninguno de ellos define los estados clínicos básicos del modelo general de la TB. Los resultados de las simulaciones se presentan en una grilla o cuadrícula donde se representa la propagación de las epidemias y con el módulo de análisis el usuario puede observar resultados numéricos y gráficos de las dinámicas modeladas

Actualmente existen diferentes simuladores que permiten la evaluación de modelos matemáticos, tales como Evolución, PowerSim, entre otros. Por otra parte, la UIS (Universidad Industrial de Santander) ha desarrollado un simulador llamado HOMOS, creado con los principios de autómatas celulares y la tecnología de orientación a objetos; por medio de esta herramienta se pueden crear comunidades con diferentes tipos de individuos y reglas que representan el comportamiento de cada individuo y las relaciones entre los mismos, pero estas reglas son limitadas, razón que hace que los resultados obtenidos con esta herramienta en las simulaciones para modelos de difusión de infecciones (como tuberculosis) sean pocos reales, debido a la complejidad de estos fenómenos.

Como se puede notar los simuladores existentes no se adecuan a los modelos de difusión de TB ó simulan modelos matemáticos ó presentan reglas limitadas para la simulación de los modelos de difusión de infecciones y además no proporcionan la visualización espacial de los resultados de las simulaciones, visualización que facilitaría al personal médico el diseño de estrategias de prevención y control, estas fueron las motivaciones para crear un simulador para simular el modelo de difusión de tuberculosis desarrollado. El simulador

recibe el nombre de Simulador de difusión de la TB (SimTB) y presenta los resultados de las simulaciones espacialmente.

En la primera parte de este capítulo se explicó en que consiste un modelo basado en individuos o agentes y los conceptos alrededor de este tipo de modelos, después se presentaron modelos y enfoques de estudio acerca de las dinámicas de la tuberculosis y algunos simuladores para dichos modelos, por último se expresaron las consideraciones generales para el modelo desarrollado en este trabajo de grado: “Modelo basado en individuos de difusión de la tuberculosis”. El siguiente capítulo explica detalladamente el modelo basado en individuos de difusión de la tuberculosis. Con los conceptos adquiridos en este capítulo se espera que el lector asimile fácilmente el modelo basado en individuos de difusión de la tuberculosis.

2 MODELO BASADO EN INDIVIDUOS DE DIFUSION DE LA TUBERCULOSIS

La estructura de este capítulo busca hacer mas claro el entendimiento del *modelo basado en individuos de difusión de la tuberculosis*, de acuerdo a los conceptos brindados en el capítulo anterior; por lo tanto se empieza definiendo el sistema modelado, posteriormente se explica el modelo y sus componentes y por último se habla sobre el objetivo de la simulación de dicho modelo. En este capítulo los agentes o los individuos serán tenidos en cuenta como habitantes de la población.

2.1 SISTEMA

En el Municipio de Popayán, la tasa de incidencia de enfermos de tuberculosis venía en descenso desde 1990 hasta 1996, cuando se reportaron 9.9 casos por 100.000 habitantes, el Ministerio de Salud consideró que el descenso de la tasa de incidencia se debió a la disminución de la búsqueda de casos y al subregistro de los enfermos diagnosticados. En el año 2000, y gracias a una campaña de mayor búsqueda de pacientes, la tasa de incidencia se incrementó en 330%, alcanzando 32 casos por 100.000 habitantes. Además, los factores socioeconómicos predisponentes para el desarrollo de la enfermedad tales como: altas tasas de desempleo, pobreza extrema, desnutrición, hacinamiento, población desplazada en crecimiento y servicios médicos insuficientes, se combinan en nuestra región de manera preocupante y en general, en todos los países en vía de desarrollo.

El sistema de estudio es el fenómeno de la difusión de la tuberculosis en una región geográfica, es decir la difusión de la tuberculosis en su población de habitantes, particularmente la experimentación con el simulador de difusión de tuberculosis, fue realizada para la ciudad de Popayán, los habitantes de la población son heterogéneos en cuanto a sus características de género, edad y factores de riesgo, características que afectan el *estado clínico* de cada habitante de la población.

Los *estados clínicos* del habitante son los siguientes: Sano, Infectado, Enfermo, Muerto, Tratado Contagioso, Tratado, Curado, Tratamiento Terminado, Abandono, Fracaso y Resistente.

2.2 MODELO

El modelo del sistema de estudio es un modelo basado en individuos conformado por tres componentes, los habitantes, el ambiente y las interacciones entre los habitantes, a continuación se explica en que consiste cada uno de dichos componentes.

2.2.1 HABITANTE

El modelo ha sido concebido para observar la difusión de la tuberculosis (TB) en la población de una región geográfica, población conformada por habitantes de diferentes edades, diferente género y/o con factores de riesgo asociados a la TB. *El habitante de esta población se modela como un agente o un individuo cuyo propósito de diseño es representar la dinámica evolutiva de la TB en dicho habitante.*

En adelante para hacer referencia al *individuo o agente* del modelo basado en individuos de difusión de la tuberculosis se usará el término *habitante*.

El habitante es modelado como un agente y no como un agente inteligente, ya que el habitante se comporta autónomamente para cumplir con su objetivo de diseño, pero no posee las características de reactividad y habilidad social, el ambiente en el que se ubican los habitantes no sufre cambios, por lo que el habitante no tendrá que responder a cambios o eventos provenientes de su ambiente (sin reactividad) y este agente no coopera con otros agentes para alcanzar su objetivo (sin habilidad social), por estas razones el habitante no es un agente inteligente.

Para un mayor entendimiento del modelado que se realizó para un habitante se aconseja leer en los anexos las generalidades acerca de la tuberculosis.

Variables de Estado Internas

De acuerdo a los referentes teóricos sobre la enfermedad de la TB, a la Guía de atención de TB pulmonar y extra-pulmonar de Colombia y a análisis realizados con los asesores temáticos, se definieron las siguientes variables de estado internas relevantes para un habitante: *edad, grupo de edad, género, factores de riesgo, zona y estado clínico* y sus respectivos valores. Un habitante tendrá un solo valor para cada una de sus variables internas a excepción de los factores de riesgo, debido a que un habitante puede no tener factores de riesgo o puede tener uno o más factores de riesgo. Por ejemplo, un habitante podría presentar los factores de riesgo de sida o VIH+ y consumo de sustancias psicoactivas mientras que otro habitante puede estar libre de factores de riesgo.

Edad

Esta variable interna corresponde a la edad en meses o años del habitante.

Grupo de edad

Los valores posibles para el grupo de edad de un habitante son: 0 - 6 meses, 7 meses - 2 años, 3 - 10 años, 11 - 18 años, 19 - 40 años, 41 - 60 años y 61 años en adelante.

Género

Esta variable identifica el género del habitante: Masculino y Femenino.

Factores de riesgo

Los distintos factores que un habitante puede tener son: hacinamiento, otros factores de transmisión, desnutrición, sida o VIH+, diabetes, otras enfermedades debilitantes y anergizantes, administración de corticoides o inmunosupresores, consumo de sustancias psicoactivas, estrés y malas condiciones sanitarias.

Zona

Indica la zona en la que se encuentra ubicado el habitante en la ciudad, por ejemplo estas zonas pueden representar los estratos de la ciudad

Estado clínico

El estado clínico del habitante es la variable de estado interna dinámica en el tiempo y que depende de las anteriores. De acuerdo a los referentes teóricos sobre la enfermedad y a análisis realizados con los asesores temáticos, se definieron los siguientes estados clínicos para un habitante: *Sano, Infectado, Enfermo, Muerto, Tratado Contagioso, Tratado, Curado, Tratamiento Terminado, Abandono, Fracaso y Resistente.*

La definición de cada uno de los estados del habitante es la siguiente:

- *Sano:* habitante o persona no infectada de TB
- *Infectado:* habitante infectado de TB, no contagioso
- *Enfermo:* habitante enfermo de TB, el cual puede ser contagioso o no contagioso según su tipo de TB (TB pulmonar -> contagioso, TB extrapulmonar -> no contagioso) y su grupo de edad.
- *Muerto:* habitante muerto debido a TB.
- *Tratado Contagioso:* habitante que empezó tratamiento pero sigue siendo contagioso.
- *Tratado:* habitante en tratamiento que después de cierto tiempo deja de ser contagioso.
- *Curado:* habitante con condición de egreso (resultado del tratamiento) de curado, es decir, caso con baciloscopia inicial positiva que terminó el tratamiento y tuvo baciloscopias de esputo negativas en por lo menos dos ocasiones, una de ellas al concluir el tratamiento.
- *Tratamiento Terminado:* habitante con condición de egreso de tratamiento terminado, es decir, caso con baciloscopia inicial positiva que concluyó el tratamiento, pero que no se le realizó baciloscopia de control al final del tratamiento.
- *Abandono:* habitante con condición de egreso de abandono, es decir, paciente que suspende el tratamiento durante un mes o más.
- *Fracaso:* habitante con condición de egreso de fracaso, es decir, caso con baciloscopia inicial positiva que siguió siendo, o volvió a ser, positiva al cuarto mes de haber comenzado el tratamiento. En estos casos debe solicitarse una

baciloscopia de control al quinto mes de tratamiento. Si ésta resulta positiva se considera como fracaso.

- *Resistente*: habitante que presenta resistencia a los medicamentos del tratamiento de TB.

En la siguiente figura se presenta un ejemplo de un habitante con sus variables de estado internas.

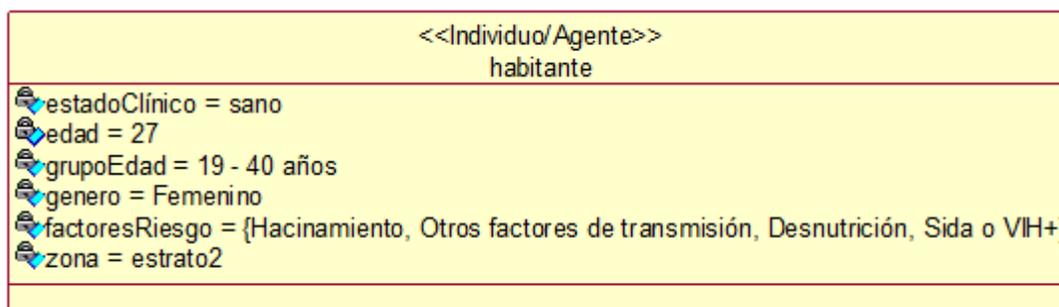


Fig. 3. 1 Variables de estado internas

Reglas de comportamiento

Las reglas de comportamiento, enmarcadas en la dinámica evolutiva de la TB en un habitante, fueron abstraídas a partir de los referentes teóricos y del conocimiento de los especialistas en TB. Cada *regla de comportamiento* corresponde a cada cambio de estado de la dinámica evolutiva de la TB que un habitante pueda presentar; por lo tanto, el habitante, debido a sus reglas de comportamiento, podrá presentar diferentes estados clínicos de la dinámica evolutiva de la TB

Un cambio de estado clínico en un habitante se produce al evaluar, durante un intervalo de tiempo o en un tiempo específico, las probabilidades que están asociadas a dicho cambio de estado, solo se evalúan las probabilidades de las características que presenta el habitante. Como resultado de la evaluación de probabilidades, el habitante puede cambiar de estado o permanecer en su estado clínico actual.

Se optó por la evaluación de probabilidades para los cambios de estado porque con la evaluación de una probabilidad se puede obtener un éxito o un fracaso, de esta forma, la *evaluación de probabilidades*, para el proceso de cambio de estado de un habitante, permite representar adecuadamente la incertidumbre intrínseca de un habitante en alcanzar, o no alcanzar, los diferentes estados clínicos que constituyen la dinámica de la tuberculosis en el habitante. Esta incertidumbre intrínseca que se menciona, se refiere a que en cada cambio de estado intervienen además de sus factores de riesgo asociados (definidos en este modelo), múltiples fenómenos que no pueden ser medidos o estimados, y que están asociados a cada habitante, como las características físicas propias y características del ambiente, por lo tanto no se puede asegurar que un habitante aun con todos los factores de riesgo relacionados con un cambio de estado, en realidad alcance un siguiente estado. Por ejemplo, para que un habitante sano cambie de estado sano a infectado (cambio de estado detallado más adelante), es necesario que tenga un contacto con un habitante enfermo contagioso y que presente factores de riesgo de hacinamiento y/o otros factores de transmisión (ambientes sin ventilación, ambientes sin iluminación), pero a pesar de que un habitante sano haya sufrido un contacto con un enfermo y posea todos los factores de riesgo predisponentes para convertirse en un habitante infectado, es posible que el habitante sano no pase a ser un habitante infectado, pues el contacto con el enfermo presenta diferentes características de difícil cuantificación y que influyen en el cambio de estado, características tales como:

- Tiempo de exposición con el enfermo contagioso
- Densidad de bacilos en el ambiente expulsados por el enfermo contagioso
- Efectividad contagiosa del bacilo (un bacilo puede ser mas contagiosos que otro)
- Distancia entre el habitante sano y el enfermo

Por este motivo otorgar probabilidades para contacto, contacto y hacinamiento, contacto y otros factores de transmisión, es la mejor forma de considerar el efecto y la incertidumbre que causan las características nombradas anteriormente.

Los valores de las probabilidades de cada cambio de estado, en el modelo basado en individuos de difusión de la tuberculosis, dependen de los deseos del usuario del modelo, si este desea configurar el modelo de la forma mas cercana a la realidad, los valores de

las probabilidades deben corresponder a las generalidades, estudios sobre la tuberculosis y experiencia de especialistas, según estas 3 fuentes lo habitual es que, en un cambio de estado dependiente de varios factores de riesgo, se conozca cual es el factor de mayor riesgo de producir el cambio de estado, este valor sirve de referencia para asignar los valores de las probabilidades de los otros factores de riesgo. Por ejemplo, el cambio de estado para un habitante de infectado a enfermo (detallado más adelante) tiene asociados varios factores de riesgo, uno de ellos es el sida o VIH+, según las 3 fuentes nombradas anteriormente este es el factor de riesgo más influyente para este cambio de estado y el valor de su probabilidad es de 0.5.

El usuario del modelo también puede asignar valores hipotéticos a las probabilidades de cada cambio de estado para observar la dinámica de difusión de la tuberculosis en la población, según sus hipótesis.

A continuación se detalla cada uno de los *cambios de estado* que pueden ocurrir en un habitante y las probabilidades asociadas a cada cambio de estado.

Cambio de estado Sano - Infectado

Probabilidades asociadas:

Contacto, Contacto y hacinamiento, Contacto y otros factores.

Un habitante con estado clínico sano (S) puede cambiar su estado a infectado (I) debido a contactos cercanos (diarios y prolongados) con un habitante de estado enfermo (E) y además contagioso, no se consideran contactos casuales. Un habitante enfermo es contagioso si tiene tuberculosis pulmonar y si su edad pertenece a un grupo de edad contagioso, los grupos de edad que pueden ser o no contagiosos son los siguientes: 0 - 6 meses, 7 meses - 2 años, 3 - 7 años, 8 - 13 años, 14 - 18 años, 19 - 40 años, 41 - 60 años y 61 años en adelante.

Para un habitante con estado S que tiene un contacto con un habitante de estado E contagioso, pero que no tiene factores de riesgo para infección, (hacinamiento, otros factores de transmisión) se utiliza la probabilidad de Contacto.

Para un habitante con estado S que tiene un contacto con un habitante de estado E contagioso y tiene un solo factor de riesgo, se utiliza la probabilidad de Contacto y factor de riesgo, según sea el caso.

Para un habitante con estado S que tiene un contacto con un habitante de estado E contagioso y tiene más de un factor de riesgo se utilizan independientemente cada una de las probabilidades de Contacto y factor de riesgo que lo afectan.

Cambio de estado Infectado - Enfermo

Probabilidades asociadas:

A grupos de edad: 0 - 6 meses, 7 meses - 2 años, 3 -10 años, 11 - 18 años, 19 - 40 años, 41 - 60 años, 61 años en adelante.

A factores de riesgo: Desnutrición, Sida o VIH+, Diabetes, Otras enfermedades debilitantes y anergizantes, Administración de corticoides o inmunosupresores, Consumo de sustancias psicoactivas, Estrés, Malas condiciones sanitarias.

A género: Masculino, Femenino.

Tuberculosis pulmonar: probabilidad de que el habitante infectado llegue a ser enfermo de TB pulmonar².

Para un habitante con estado infectado (I) que presente alguna de las características asociadas a este cambio de estado se utiliza la probabilidad para esa característica.

Para un habitante con estado I que presente más de una de las características se utilizan independientemente las probabilidades que la afectan.

Cuando un habitante con estado I llega a ser enfermo, debido a cualquiera de las anteriores probabilidades, se utiliza la probabilidad de TB pulmonar para predecir el tipo de TB del enfermo: pulmonar o extrapulmonar.

² Existen diversas formas de TB, solo la TB pulmonar es contagiosa.

Cambio de estado Enfermo - Muerto

Probabilidades asociadas:

Menores de 5 años, Mayores o iguales a 5 años, SIDA, sin SIDA.

Para un habitante con estado enfermo (E) con SIDA se utilizan independientemente la probabilidad por SIDA y la probabilidad correspondiente a su edad.

Para un habitante con estado E sin SIDA se utilizan independientemente la probabilidad de sin SIDA y la probabilidad correspondiente a su edad.

Cambio de estado Enfermo - Tratado / Tratado Contagioso

Probabilidades asociadas:

Consumo sustancias psicoactivas, Sin consumo de sustancias psicoactivas

Si el habitante con estado E es contagioso puede pasar a Tratado contagioso, si no es contagioso puede pasar a Tratado.

Para un habitante con estado E que consuma sustancias psicoactivas se utiliza la probabilidad de consumo de sustancias psicoactivas.

Para un habitante con estado E contagioso que no consuma sustancias psicoactivas se utiliza la probabilidad de sin consumo de sustancias psicoactivas.

Cambio de estado Tratado Contagioso - Tratado

Probabilidades asociadas:

Consumo sustancias psicoactivas, Sin consumo de sustancias psicoactivas

Para un habitante con estado tratado contagioso (Tc) que consuma sustancias psicoactivas se utiliza la probabilidad de consumo de sustancias psicoactivas.

Para un habitante con estado tratado contagioso (Tc) que no consuma sustancias psicoactivas se utiliza la probabilidad de sin consumo de sustancias psicoactivas.

Cambio de estado Tratado - Curado / Tratamiento Terminado

Probabilidad asociada:

Probabilidad general.

Se refiere a la probabilidad de un habitante con estado tratado (T), que no haya abandonado o fracasado en el tratamiento, de llegar a ser un habitante con estado curado (C), si la probabilidad no es exitosa, el habitante con estado T llega a ser habitante con estado tratamiento terminado (TT).

Cambio de estado Tratado - Abandono

Probabilidades asociadas:

Consumo sustancias psicoactivas, Sin consumo de sustancias psicoactivas.

Para un habitante con estado T que consume sustancias psicoactivas se utiliza la probabilidad de consumo de sustancias psicoactivas.

Para un habitante con estado T que no consume sustancias psicoactivas se utiliza la probabilidad de sin consumo de sustancias psicoactivas.

Cambio de estado Tratado - Fracaso

Probabilidad asociada:

Probabilidad general.

La probabilidad de que un habitante con estado T fracase, debido a una supervisión inadecuada en el tratamiento.

Cambio de estado Tratado - Muerto

Probabilidades asociadas:

SIDA, sin SIDA

Para un habitante con estado T con SIDA se utiliza la probabilidad de morir por tener SIDA

Para un habitante con estado T sin SIDA se utiliza la probabilidad de morir sin tener SIDA

Cambio de estado Tratado - Resistente

Probabilidades asociadas:

Supervisión inadecuada y Abandono

A todo habitante con estado T se le corre la probabilidad de supervisión inadecuada que indica la posibilidad de cambiar a estado resistente (R), debido a estar en tratamiento.

A todo habitante con estado T se le corre la probabilidad de abandono que indica la posibilidad de cambiar a estado resistente (R), debido al abandono del tratamiento.

Después de haber explicado cada uno de los cambios de estado, *las reglas de comportamiento del habitante* se definen de la siguiente manera:

- Un habitante con estado S puede pasar a ser un habitante con estado I, si tiene un contacto cercano con un habitante con estado E, según las probabilidades de contacto, contacto y hacinamiento y contacto y otros factores; a lo largo de un intervalo de tiempo determinado $[t_i, t_f]$.
- Un habitante con estado I puede pasar a ser un habitante con estado E, según las probabilidades dadas por grupos edad, género y factores de riesgo; a lo largo de un intervalo de tiempo determinado $[t_i, t_f]$.
- Un habitante con estado E puede pasar a ser un habitante con estado M, según las probabilidades: Menores de 5 años, Mayores o iguales a 5 años, SIDA, sin SIDA; a lo largo de un intervalo de tiempo determinado $[t_i, t_f]$.
- Un habitante con estado E contagioso, puede pasar a ser un habitante con estado Tc, según las probabilidades: Consumo sustancias psicoactivas, Sin consumo de sustancias psicoactivas; a lo largo de un intervalo de tiempo determinado $[t_i, t_f]$.

- Un habitante con estado T_c puede pasar a ser un habitante con estado T , según las probabilidades: Consumo sustancias psicoactivas, Sin consumo de sustancias psicoactivas; a lo largo de un intervalo de tiempo determinado $[t_i, t_f]$.
- Un habitante con estado T puede pasar a ser un habitante con estado C/TT , según una probabilidad general; en un tiempo determinado t_F . t_F debe ser el límite superior para los cambios de estado de $T-A$, $T-F$, $T-M$, $T-R$.
- Un habitante con estado T puede pasar a ser un habitante con estado A , según las probabilidades: Consumo sustancias psicoactivas, Sin consumo de sustancias psicoactivas; a lo largo de un intervalo de tiempo determinado $[t_i, t_f = t_F]$.
- Un habitante con estado T puede pasar a ser un habitante con estado F , según una probabilidad general; a lo largo de un intervalo de tiempo determinado $[t_i, t_f = t_F]$.
- Un habitante con estado T puede pasar a ser un habitante con estado M , según las probabilidades: SIDA, sin SIDA; a lo largo de un intervalo de tiempo determinado $[t_i, t_f = t_F]$.
- Un habitante con estado T puede pasar a ser un habitante con estado R , según las probabilidades: Supervisión inadecuada y Abandono; a lo largo de un intervalo de tiempo determinado $[t_i, t_f = t_F]$.

En cada regla de comportamiento t_i y t_f representan respectivamente: el tiempo desde el cual un estado puede cambiar a otro y por lo tanto desde el cual se empiezan a evaluar las probabilidades asociadas y el tiempo hasta el cual un estado puede cambiar a otro y hasta el cual se evalúan dichas probabilidades.

Ejecución de probabilidades

Cuando a un habitante se le ejecuten varias probabilidades asociadas a un mismo cambio de estado, y si una o más probabilidades son exitosas, el habitante cambiará de estado.

Cuando a un habitante se le ejecuten varias probabilidades para varios cambios de estados (Ej.: $T-A$, $T-F$, $T-M$, $T-R$), y si dos o más probabilidades son exitosas al mismo tiempo se escogerá el cambio de estado con mayor probabilidad.

La Fig. 3.2 presenta los diferentes cambios de estado de un habitante.

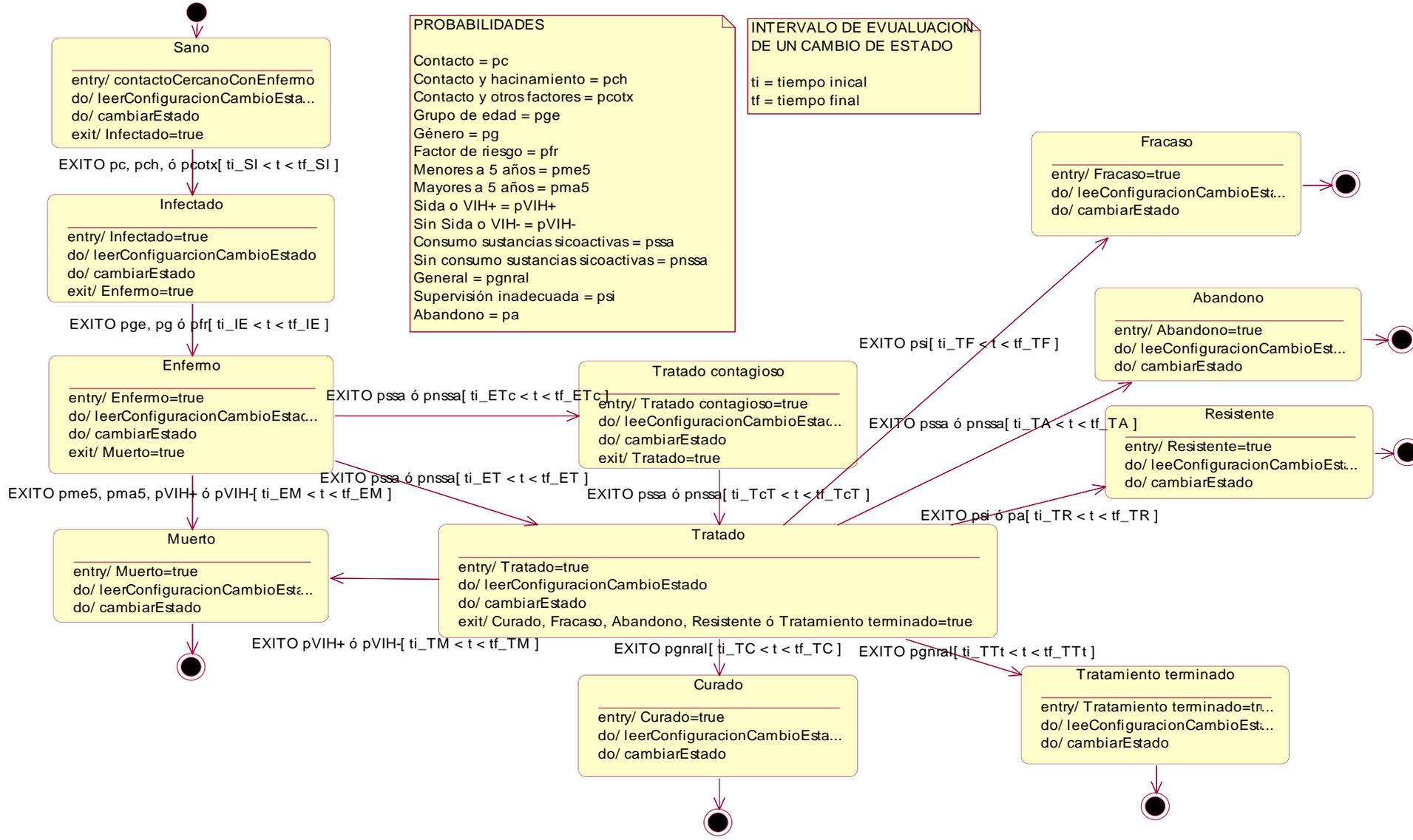


Fig. 3. 2 Cambios de estado de un habitante

2.2.2 AMBIENTE

El ambiente donde se ubican los habitantes, básicamente es un espacio discreto o grilla cuadrada de dos dimensiones y su característica principal es tener una referencia espacial de cada uno de los habitantes.

Se puede pensar que el modelo de difusión de la tuberculosis al estar basado en los contactos cercanos de los habitantes, no necesita considerar para cada uno de los habitantes iniciales con estado E, un espacio con numerosos habitantes, sino, únicamente el grupo de habitantes con los que tiene contactos cercanos, regularmente de 4 a 8 personas. Pero, un habitante con estado S inicialmente ubicado en el espacio de un enfermo inicial, puede llegar a ser un habitante con estado E, lo que haría que los habitantes con estado S próximos a este nuevo habitante con estado E, sean nuevos contactos cercanos.

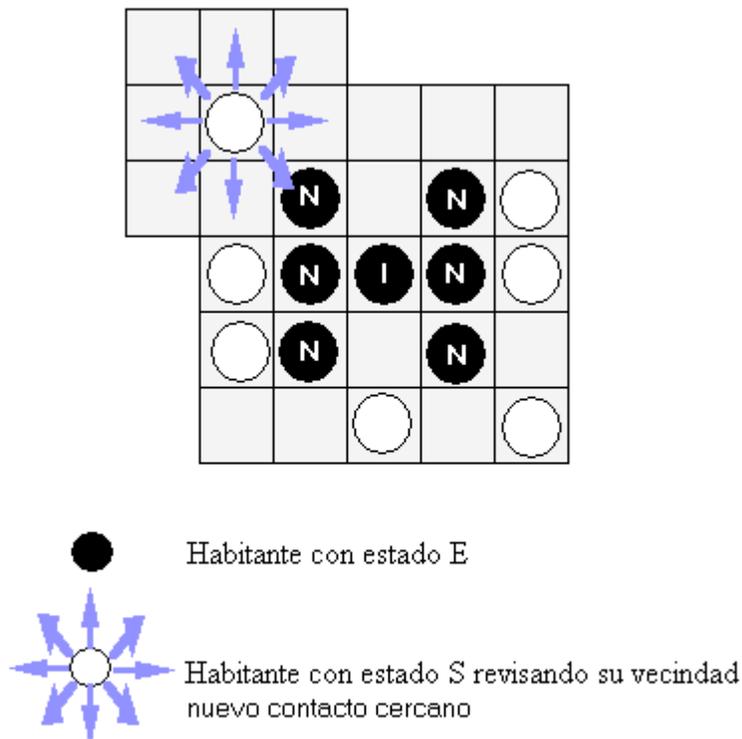


Fig 3. 3 Nuevos contactos cercanos causados por nuevos habitantes con estado E

Como se observa en la Fig 3.3 los habitantes con estado E identificados con la letra N, son los habitantes que inicialmente eran habitantes con estado S y que han evolucionado en habitantes con estado E nuevos para este ambiente, estos nuevos habitantes con estado E, provocan nuevos contactos cercanos, que inician la dinámica evolutiva de la tuberculosis en cada uno de los habitantes con estado S.

La difusión de la tuberculosis en una población, así esta basada en contactos cercanos, necesita que el ambiente no limite espacialmente la posible difusión de la tuberculosis entre sus habitantes y de esta forma tener una mejor comprensión del fenómeno global de la difusión de la tuberculosis, de acuerdo a cualquier consideración en las probabilidades asociadas a cada factor de riesgo. Por esta razón, el modelo no solo considera a los habitantes con los que un enfermo puede tener contactos cercanos, considera más habitantes, de tal forma que se pueda observar la difusión de la tuberculosis en un grupo mayor de población. A mayor tiempo pueden aparecer más enfermos y por lo tanto más contactos cercanos en la población, de esta forma el número de habitantes o población en el espacio de un enfermo inicial, a considerar en el modelo, es dependiente del tiempo de simulación del modelo y de la misma forma el tamaño del espacio donde se ubican los habitantes es dependiente de este tiempo.

Las *dimensiones* del espacio o grilla, que se crea para cada uno de los habitantes iniciales de estado E, están en función de los *pasos de simulación*, es decir, son proporcionales al tiempo que se desea simular el modelo basado en individuos de difusión de la TB.

De esta forma tendríamos que las dimensiones estarían dadas por la siguiente función:

$$d = k * ps$$

Donde:

Ps: pasos de simulación.

K=constante

Entonces si $ps = 1$ y $k=1$, se obtendrá una grilla 1x1 con solo una posición, que no tiene ningún sentido pues evita la ubicación de mas habitantes distintos al enfermo. Si $k=2$ y $ps=1$, se formara una grilla 2x2 donde se podrían ubicar 3 habitantes con estado S y el habitante con estado E inicial como se muestra en la Fig 3.4.

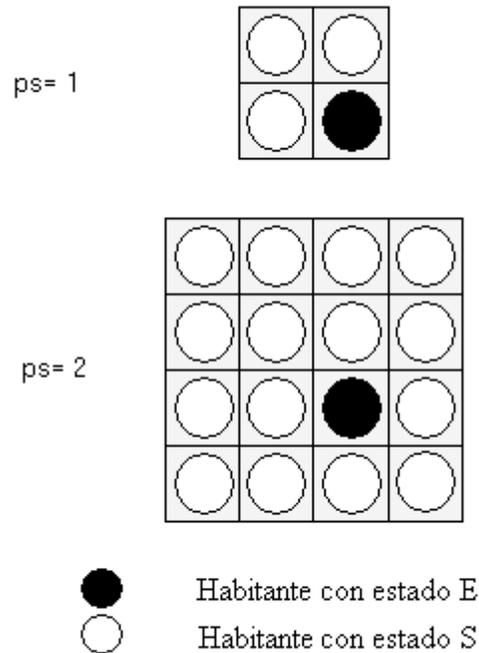


Fig 3. 4 Grilla con k=2

Pero esta distribución de los habitantes con estado S alrededor del habitante con estado E, no es equitativa o simétrica y la difusión de la TB no tendría la misma posibilidad de difusión en todas las direcciones, lo mismo ocurre para $k > 2$ en pasos de simulación pares.

Para resolver la dificultad de simetría alrededor del habitante inicial con estado E, se le asignó el valor de 2 a k y se le sumo a la ecuación anterior la unidad, de esta manera se corrigió el error de simetría y se mantuvo la proporcionalidad entre las dimensiones y los pasos de simulación, la ecuación para las dimensiones del espacio o grilla es la siguiente:

$$d = (ps \times 2) + 1$$

Donde:

d: dimensión del espacio o grilla.

ps: pasos de simulación.

En la Fig 3.5 se muestra el resultado de crear el espacio o grilla con la ecuación anterior, manteniendo la proporcionalidad y la simetría.

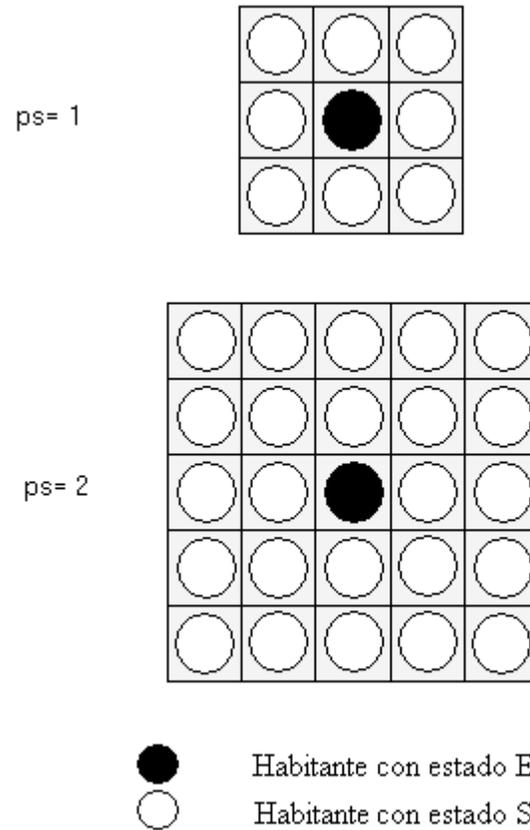


Fig 3. 5 Espacio o grilla para un habitante E inicial

La cantidad de habitantes en el espacio o grilla, esta en función de sus dimensiones y de un porcentaje de grilla (pg) que indica la porción de la grilla que contiene habitantes, como se indica a continuación:

$$población = hsi + ei = d^2 \times \frac{pg}{100}$$

Donde:

población: cantidad de habitantes en el espacio o en la grilla.

hsi: habitantes sanos iniciales.

ei : enfermo inicial.

d: dimensión del espacio o grilla.

pg: porcentaje de la grilla.

El porcentaje de grilla fue incluido en la ecuación de cantidad de habitantes o población para controlar la densidad de población alrededor de un enfermo inicial.

Si el valor para la población resulta diferente de entero se debe asegurar que lo sea y sea menor o igual a la cantidad de ubicaciones probables dentro del espacio o grilla (d^2).

Caracterización de los habitantes con estado S del espacio del habitante con estado E

La caracterización de los habitantes con estado S del espacio del habitante con estado E, se realiza según los datos asociados a la variable *zona* del habitante con estado E. Estos datos corresponden a los porcentajes de población de la zona según género, grupo de edad y factores de riesgo.

Para esta caracterización se calcula el número de mujeres, de hombres y el número de habitantes de cada grupo de edad, según los datos de la zona del habitante con estado E.

Para cada habitante con estado S se realizan las siguientes asignaciones:

Asignación de genero: se utiliza un generador de ceros o de unos, si se obtiene un cero y el numero de mujeres no se ha superado, el habitante tendrá genero: mujer, de lo contrario el habitante tendrá genero: hombre.

Asignación de grupo de edad: se escoge aleatoriamente un grupo de edad, este grupo de edad se asigna a la cantidad de habitantes correspondiente a ese grupo de edad, cuando se supera esta cantidad se escoge otro grupo de edad.

Asignación de edad: según el grupo de edad del habitante se escoge aleatoriamente una edad para asignársela.

Asignación de zona: se le asigna la zona del habitante inicial con estado E.

Asignación de contagiosos: asigna de acuerdo a la edad que pertenece el habitante la cualidad de ser contagioso o no serlo.

Ubicación de los habitantes en la grilla

El habitante con estado E se ubica en la posición central del espacio o la grilla. Los habitantes con estado S se empiezan ubicando en el contorno alrededor del habitante con estado E, la cantidad de habitantes del contorno alrededor del habitante con estado E depende de la siguiente ecuación:

$$ch1^{er} \text{ contorno} = 8 \times \frac{pg}{100}$$

Donde:

ch1^{er} contorno: Cantidad habitantes 1er contorno.

pg: porcentaje de la grilla.

pg permite controlar el numero de habitantes vecinos del enfermo inicial. Con *pg* = 100 el habitante E inicial tendrá 8 habitantes S vecinos.

La idea del primer contorno esta expresado en la siguiente figura:

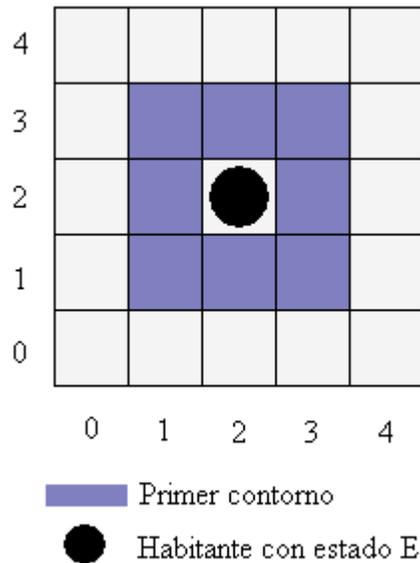


Fig 3. 6 Contorno del habitante con estado E

La posición x y y de cada habitante *del primer contorno* se escoge generando aleatoriamente un entero entre el centro de la grilla - 1 y el centro de la grilla + 1, si la posición esta libre el habitante se ubica en esa posición. Para la Fig 3.4 el centro de la grilla es (2,2) por lo que la generación aleatoria tanto para x como para y iría de la posición 1 hasta la posición 3.

Si existen habitantes restantes, para cada uno de ellos, se escoge una posición x y y aleatoriamente entre 0 y la dimensión de la grilla - 1 ($d-1$), si la posición esta libre el habitante se ubica en esa posición.

Asignación de los factores de riesgo para los habitantes con estado S del espacio del habitante con estado E

En la asignación de los factores de riesgo, se calcula el número de habitantes para cada factor de riesgo según los datos de factores de riesgo asociados a la zona del habitante con estado E.

Se escoge un factor de riesgo de los factores de riesgo asociados a la zona, según la cantidad de habitantes para ese factor de riesgo se realiza el siguiente proceso tantas veces como indique esta cantidad:

Se escoge aleatoriamente una posición x y y entre cero (0) y la dimensión de la grilla -1 ($d-1$) y que tenga ubicado en ella a un habitante al cual no se le haya asignado este factor de riesgo, a este habitante se le asigna el factor de riesgo.

Se escoge otro factor de riesgo y se repite el procedimiento. El proceso se realiza hasta que se hayan escogido todos los factores de riesgo asociados a la zona.

A un habitante se le pueden asignar uno, más de uno o ningún factor de riesgo.

2.2.3 INTERACCIONES

Los habitantes con estado S siempre revisan su vecindad (vecindad de Moore-Fig.3-5) para encontrar si sus habitantes vecinos son habitantes con estado E y además contagiosos o habitantes con estado Tc (tratado contagioso), al encontrar en su vecindad un habitante que tenga cualquiera de estos dos estados, el habitante con estado S ejecutará su regla de comportamiento (S-I). La vecindad considerada en este modelo fue la vecindad de Moore, conformada por 8 posiciones alrededor del enfermo, porque en promedio un habitante S puede tener contactos cercanos hasta con habitantes.

De acuerdo a los estados clínicos que alcance el habitante, este ejecutara sus reglas de comportamiento correspondientes.

La revisión de la vecindad que hace el habitante con estado S se muestra en la siguiente figura:

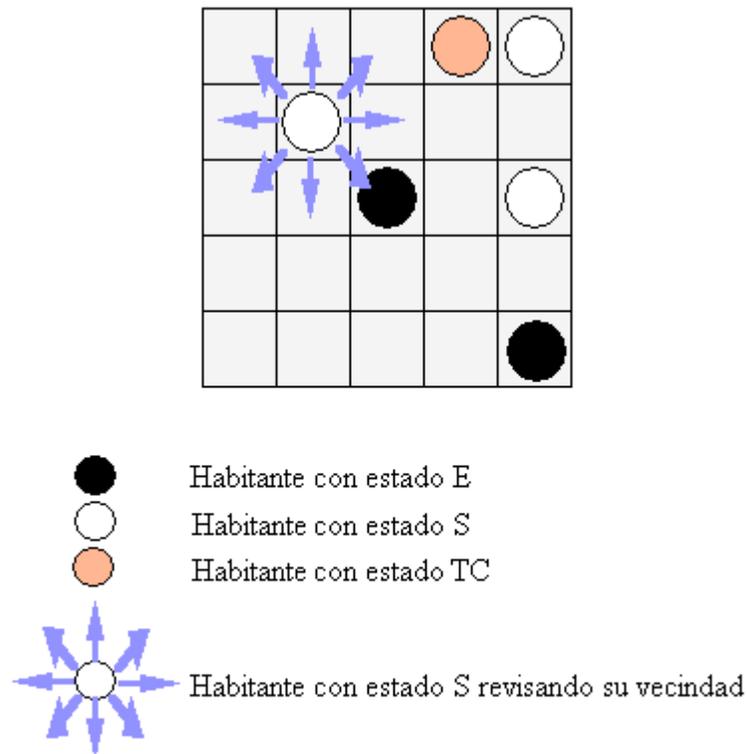


Fig. 3. 7 Interacción del habitante

En la siguiente Figura se presenta un ejemplo de un habitante con sus variables de estado internas, sus reglas de interacción y de comportamiento.

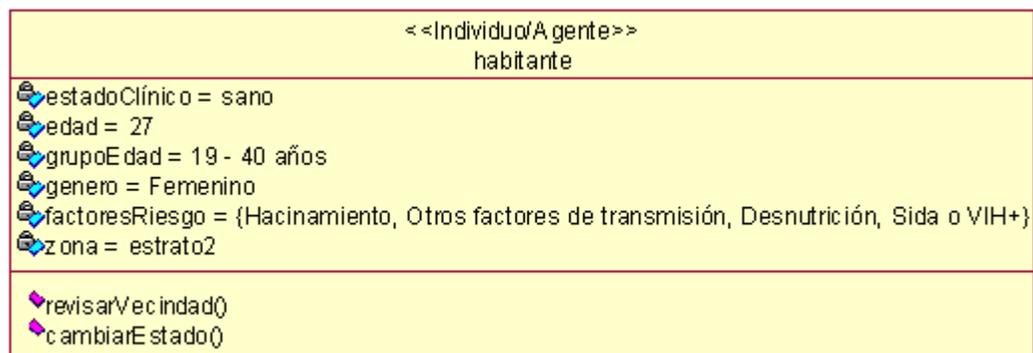


Fig 3. 8 Habitante

2.3 SIMULACIÓN

Con la simulación del modelo basado en individuos de difusión de la TB, se busca predecir el comportamiento de la difusión de la tuberculosis en una población, en el último capítulo de experimentación, la población de estudio es la población de la ciudad de Popayán.

El modelo no considera natalidad ni mortalidad natural, así, el Simulador que implementa el modelo tiene como máximo tiempo de simulación un año. El tiempo de simulación o pasos de simulación está dado en meses.

Una simulación se realiza con un número deseado de habitantes de estado E, a cada uno de estos habitantes iniciales de estado E se le crea su ambiente y los habitantes de estado S con lo que podría interactuar, habitantes que también son ubicados en dicho ambiente. En cada ambiente, para cada paso de simulación, los habitantes se comportan e interactúan con otros según su objetivo de diseño, esto permite observar, al final de la simulación, el fenómeno emergente de la difusión de la TB en una región geográfica.

El modelo basado en individuos de la difusión de la tuberculosis fue abstraído a partir de referentes teóricos y de los aportes y experiencias del asesor temático de este proyecto, el modelo es concebido para ser aplicado en zonas espaciales o geográficas, delimitadas por un grupo de características o factores de riesgo. El modelo como tal está compuesto por 1. Los habitantes, cuyo comportamiento está definido por cambios de estado que tienen asociados factores de riesgo que permiten evaluar si el habitante permanece o cambia a su estado futuro, 2. El ambiente, que es el espacio donde estos habitantes son ubicados y 3. Las interacciones que ocasiona que un habitante sano al tener contacto con un enfermo, empiece su proceso de evaluación de cambio de estado, según los diferentes estados clínicos que alcance.

En el siguiente capítulo se presenta la captura de requerimientos y análisis de la aplicación que permite ejecutar la simulación del modelo planteado en este capítulo.

3 CAPTURA DE REQUERIMIENTOS Y ANALISIS DEL SIMULADOR DE DIFUSION DE LA TUBERCULOSIS

Para alcanzar el objetivo general de este trabajo de grado, “Desarrollar una solución tecnológica que suministre información, a los profesionales de la salud, acerca de las posibles futuras zonas de mayor prevalencia y acerca del(os) posibles grupo(s) de edad que sería(n) más afectados, dentro de dichas zonas, para el diseño de estrategias de prevención de la tuberculosis, en la ciudad de Popayán”, se tiene el siguiente objetivo específico: “Implementar un simulador de difusión de la tuberculosis en la ciudad de Popayán que permita identificar las posibles futuras zonas de mayor prevalencia y a cuál(es) grupo(s) de edad, dentro de dichas zonas, deberían apuntar las estrategias de prevención para la enfermedad”. El sistema desarrollado en este trabajo de grado es el *Simulador de difusión de la tuberculosis (SimTB)*.

3.1 CAPTURA DE REQUERIMIENTOS

3.1.1 Propósito del sistema

El sistema debe permitir al usuario la realización de simulaciones del *modelo basado en individuos de difusión de la tuberculosis* (ModeloBITb, capítulo 3). Estas simulaciones se harán a partir de habitantes enfermos ubicados en un mapa de Popayán, el sistema permitirá que las simulaciones se detengan, continúen y terminen en cualquier momento, según conveniencia del usuario. Al final de una simulación el sistema debe permitir identificar, en el mapa de la ciudad de Popayán, las posibles futuras zonas de mayor prevalencia (zonas críticas) y los grupos de edad mas afectados, dentro de dichas zonas. Cada simulación podrá ser guardada como un proyecto, al cual se podrá acceder para futuras simulaciones.

El modelo basado en individuos de difusión de la tuberculosis esta conformado por un habitante enfermo inicial, otros habitantes (con sus variables de estado internas y sus reglas de comportamiento), interacciones y un ambiente para los habitantes. Para que el *Simulador de difusión de la tuberculosis* (SimTB) ejecute simulaciones de este modelo, debe contar con: datos para cada cambio de estado, que alimenten las reglas de comportamiento de los habitantes, datos de la caracterización de la población de cada zona geográfica del mapa³, caracterización según porcentajes de grupos de edad, factores de riesgo y genero y el conocimiento de los grupos de edad contagiosos.

3.1.2 Características del sistema

- Simular la difusión de la tuberculosis en una región geográfica, según el modelo basado en individuos de difusión de la tuberculosis, a partir de algunos habitantes enfermos iniciales.
- Permitir la ubicación de los habitantes enfermos iniciales en un mapa geográfico.
- Presentar las posibles zonas de mayor prevalencia de Tuberculosis en la región geográfica (zonas críticas).
- Identificar el grupo de edad de los habitantes de las zonas críticas.
- Permitir configurar las zonas críticas según el área y el número de habitantes enfermos que el usuario desee.
- Permitir configurar cambios de estado.
- Permitir configurar la población de las zonas geográficas del mapa.
- Permitir configurar los grupos de edad contagiosos.
- Permitir el control de la simulación (iniciar, detener, reiniciar y terminar simulación)
- Manejar proyectos de simulaciones

3.1.3 Modelo conceptual

³ Para hacer referencia al término zona geográfica usualmente solo se utiliza la palabra zona, no confundir este termino con zonas críticas.

Conceptos

Los conceptos fueron abstraídos a partir de la descripción del sistema y del modelo basado en individuos de difusión de la tuberculosis.

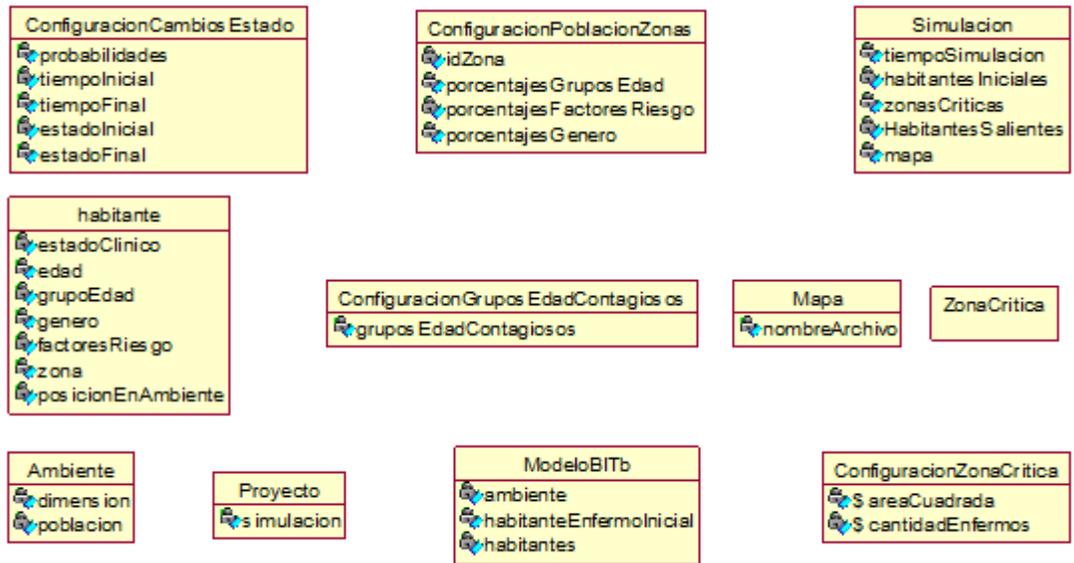


Fig 4. 1 Conceptos

Diagrama del modelo conceptual

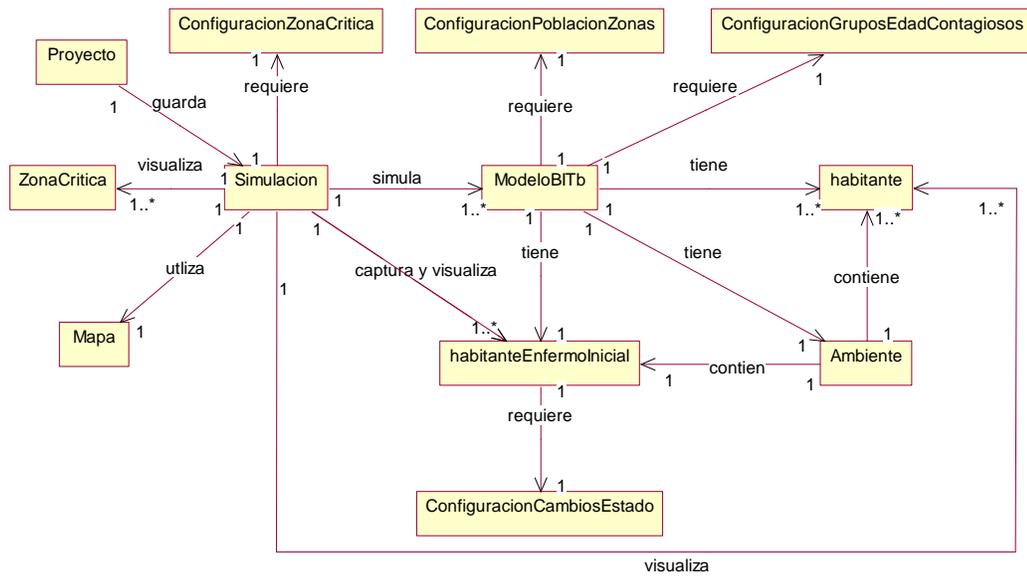


Fig 4. 2 Diagrama conceptual

3.1.4 Listado de funciones del sistema

REFERENCIA	FUNCION	CATEGORIA
R1	Configurar simulador de difusión de la tuberculosis para simulaciones	
R1.1	Configurar cambios de estado	Evidente
R1.2	Configurar población de zonas	Evidente
R1.3	Configurar grupos de edad contagiosos	Evidente
R1.4	Configurar zona critica	Evidente
R1.5	Escoger mapa	Evidente
R2	Realizar simulación	
R2.1	Cargar mapa	Evidente
R2.2	Ubicar habitantes enfermos iniciales en el mapa	Evidente
R.2.3	Establecer tiempo de simulación	Evidente
R2.4	Iniciar simulación	Evidente
R2.4.1	Crear el ambiente para cada habitante enfermo inicial	Oculto
R2.4.2	Crear habitantes del ambiente	Oculto
R2.4.3	Ubicar a los habitantes en el ambiente	Oculto
R2.4.4	Ejecutar el comportamiento y las interacciones del habitante	Oculto
R.2.5	Detener simulación	Evidente
R.2.6	Continuar simulación	Evidente
R.2.7	Terminar simulación	Evidente
R.3	Visualizar resultado de simulación	
R.3.1	Visualizar habitantes enfermos salientes	Evidente
R.3.2	Visualizar zonas criticas	Evidente
R.4	Gestionar proyectos	
R.4.1	Guardar proyecto	Evidente
R.4.2	Abrir proyecto	Evidente

R5	Graficar resultados	Evidente
R6	Mostrar Ayuda	Evidente
R7	Simular desde SIG	Evidente

3.1.5 Requisitos no funcionales

Características	Descripción	Funciones afectadas	Obligatoriedad/Opcional
Tipo de aplicación	Aplicación de escritorio	Todas	Obligatoria
Sistema Operativo	Windows 2000/XP	Todas	Obligatoria
Lenguaje de programación	Java	Todas	Obligatoria
Información persistente	Documentos XML	R.1.1, R.1.2, R.1.3, R.1.4, R.1.5.	Obligatoria

3.1.6 Modelo de casos de uso

Actor del sistema:

Usuario: el usuario del sistema puede ser médico especialistas en tuberculosis, o una persona (estudiantes de medicina) con amplios conocimientos en tuberculosis. El usuario es el encargado de realizar las configuraciones del simulador, controlar el proceso de simulación y gestionar proyectos.

Diagrama de casos de uso detallado

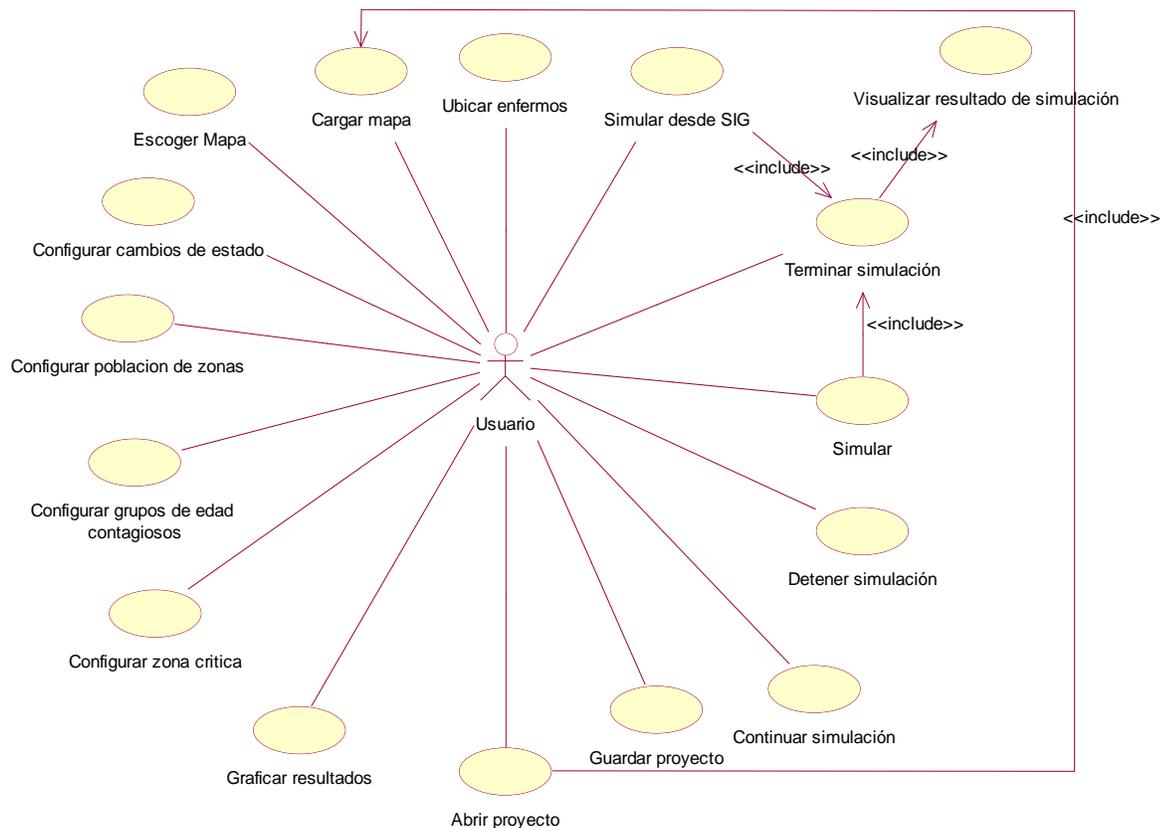


Fig. 4. 3 Diagrama de casos de usos detallado

Descripción resumida de los casos de uso

Caso de uso	Configurar cambios de estado
Actores	Usuario
Prioridad	Alta
Referencias	R.1.1
Descripción	Este caso de uso se inicia cuando el usuario desea configurar los diferentes cambios de estado que el habitante puede tener; el usuario introduce la información correspondiente a cada cambio de estado y guarda dicha información para la posterior ejecución de la

	simulación.
--	-------------

Caso de uso	Configurar población de zonas
Actores	Usuario
Prioridad	Alta
Referencias	R.1.2
Descripción	Este caso de uso es iniciado por el usuario, mediante este caso de uso el sistema le permite al usuario realizar la configuración de las características de la población para cada zona geográfica del mapa escogido.

Caso de uso	Configurar grupos de edad contagiosos
Actores	Usuario
Prioridad	Alta
Referencias	R.1.3
Descripción	Es iniciado por el usuario, mediante este caso de uso el sistema le permite al usuario realizar la configuración de los grupos de edad de los habitantes como contagiosos o no contagiosos.

Caso de uso	Escoger mapa
Actores	Usuario
Prioridad	Alta
Referencias	R.1.5
Descripción	Este caso de uso es iniciado por el usuario, le permite escoger el mapa geográfico que se utilizará para ubicar a los habitantes enfermos iniciales y para desplegar el resultado de la simulación

Caso de uso	Configurar zona crítica
Actores	Usuario
Prioridad	Alta
Referencias	R1.4
Descripción	Este caso de uso es iniciado por el usuario, le permite configurar las dimensiones del área alrededor de un habitante enfermo resultante, y la cantidad de enfermos o el umbral enfermos que permiten considerar esa área como una zona crítica

Caso de uso	Cargar mapa
Actores	Usuario
Prioridad	Alta
Referencias	R2.1
Descripción	Este caso de uso se inicia cuando el usuario necesita visualizar el lugar geográfico sobre el cual el usuario trabajará (mapa de Popayán).

Caso de uso	Ubicar enfermos
--------------------	------------------------

Actores	Usuario
Prioridad	Alta
Referencias	R2.1, R2.2
Descripción	Se inicia cuando el usuario pone los enfermos sobre un lugar geográfico, visualizado con anterioridad, y a cada habitante enfermo entrante le configura ciertas características como: edad y género.

Caso de uso	Simular
Actores	Usuario
Prioridad	Alta
Referencias	R.2.3, R.2.4
Descripción	Es iniciado por el usuario, permite la realización de una simulación durante el tiempo establecido por el usuario.

Caso de uso	Detener simulación
Actores	Usuario
Prioridad	Media
Referencias	R.2.5
Descripción	Iniciado por el usuario cuando este desea detener la simulación.

Caso de uso	Continuar simulación
Actores	Usuario
Prioridad	Media
Referencias	R.2.6
Descripción	Iniciado por el usuario cuando este desea reiniciar una simulación que ha sido detenida.

Caso de uso	Terminar simulación
Actores	Usuario
Prioridad	Alta
Referencias	R.2.7
Descripción	Iniciado por el usuario cuando este desea terminar una simulación o lanzado por el sistema cuando el tiempo de simulación ha terminado.

Caso de uso	Visualizar resultado de simulación
Actores	
Prioridad	Alta
Referencias	R2.1, R.2.7, R.3.1
Descripción	Este caso de uso se ejecuta cuando el simulador termina el proceso de simulación; permite visualizar los enfermos resultantes y las zonas críticas en el mapa (mapa de Popayán)

Caso de uso	Guardar proyecto
--------------------	-------------------------

Actores	Usuario
Prioridad	Media
Referencias	R.4.1
Descripción	Iniciado por el usuario antes de iniciar una simulación o al final de esta, permite guardar una simulación con las configuraciones, los habitantes y el mapa relacionados con dicha simulación

Caso de uso	Abrir proyecto
Actores	Usuario
Prioridad	Media
Referencias	R2.1,R4.2
Descripción	Este caso de uso se inicia cuando el usuario desea abrir un proyecto guardado, y sobre este proyecto ejecutar las posibilidades que brinda una simulación.

Caso de uso	Graficar resultados por grupos de edad
Actores	Usuario
Prioridad	Media
Referencias	R5
Descripción	Este caso de uso se inicia cuando el usuario quiere ver gráficamente (gráficos de barras o tortas) los habitantes enfermos salientes, resultado de una simulación

Caso de uso	Simular desde SIG
Actores	Usuario
Prioridad	Media
Referencias	R7
Descripción	Este caso de uso se inicia cuando el usuario desea hacer una simulación a partir de la información de los habitantes enfermos que maneja un SIG, el SIG se comunicará con el simulador para intercambiar la información de los habitantes enfermos entrantes y, terminada la simulación, la información de los habitantes enfermos salientes, esta ultima información será visualizados en el SIG.

Especificación de los casos de uso esenciales (formato expandido)

Nombre:	Configurar cambios de estado
Autores:	Angela Johana Muñoz Idrobo Andrés Felipe Meneses Paz
Actor:	Usuario
Descripción:	Este caso de uso se inicia cuando el usuario desea configurar los diferentes cambios de estado que el habitante puede tener; el usuario introduce la información asociada a cada cambio de estado

	y guarda dicha información para la posterior ejecución de la simulación.																		
Precondiciones:	Sistema activo																		
Poscondiciones:	Datos asociados a cada cambio de estado, almacenados persistentemente en el PC.																		
Prioridad:	Alta																		
Flujo normal de eventos:	<table border="0"> <tr> <td>Usuario</td> <td>Sistema</td> </tr> <tr> <td>1. Solicita configurar los cambios de estado del habitante</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2. Solicita configurar uno de los cambio de estado</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>3. Solicita un intervalo de tiempo en el cual se evalúa dicho cambio de estado</td> </tr> <tr> <td>4. Introduce los datos del tiempo</td> <td>5. Captura los datos de tiempo de evaluación del cambio de estado</td> </tr> <tr> <td>6. Solicita configurar los diferentes probabilidades que afectan dicho cambio de estado</td> <td>7. Solicita introducir las probabilidades asociadas a dicho cambio de estado.</td> </tr> <tr> <td>8. Introduce los valores de las probabilidades solicitadas Se repite el evento 2 al 7 cada vez que se quiera configurar un cambio de estado</td> <td></td> </tr> <tr> <td>9. Solicita guardar los datos configurados para todos los cambios de estados.</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>10. Guarda la configuración de los cambios de estado en un archivo de configuración de cambios de estado</td> </tr> </table>	Usuario	Sistema	1. Solicita configurar los cambios de estado del habitante		2. Solicita configurar uno de los cambio de estado			3. Solicita un intervalo de tiempo en el cual se evalúa dicho cambio de estado	4. Introduce los datos del tiempo	5. Captura los datos de tiempo de evaluación del cambio de estado	6. Solicita configurar los diferentes probabilidades que afectan dicho cambio de estado	7. Solicita introducir las probabilidades asociadas a dicho cambio de estado.	8. Introduce los valores de las probabilidades solicitadas Se repite el evento 2 al 7 cada vez que se quiera configurar un cambio de estado		9. Solicita guardar los datos configurados para todos los cambios de estados.			10. Guarda la configuración de los cambios de estado en un archivo de configuración de cambios de estado
Usuario	Sistema																		
1. Solicita configurar los cambios de estado del habitante																			
2. Solicita configurar uno de los cambio de estado																			
	3. Solicita un intervalo de tiempo en el cual se evalúa dicho cambio de estado																		
4. Introduce los datos del tiempo	5. Captura los datos de tiempo de evaluación del cambio de estado																		
6. Solicita configurar los diferentes probabilidades que afectan dicho cambio de estado	7. Solicita introducir las probabilidades asociadas a dicho cambio de estado.																		
8. Introduce los valores de las probabilidades solicitadas Se repite el evento 2 al 7 cada vez que se quiera configurar un cambio de estado																			
9. Solicita guardar los datos configurados para todos los cambios de estados.																			
	10. Guarda la configuración de los cambios de estado en un archivo de configuración de cambios de estado																		
Flujos alternativos:	<p>FA1: sobrescribir configuración; en cualquier momento el usuario modifica un cambio de estado ya configurado</p> <p>FA2: configuración cancelada; en cualquier momento el usuario cancela la configuración.</p>																		
Excepciones:	Datos erróneos en los eventos 4 y 8. Desplegar error en datos introducidos.																		
Requerimientos especiales:	Para el evento 10 es necesario utilizar un mecanismo de persistencia																		

Nombre:	Configurar población de zonas
Autores:	Angela Johana Muñoz Idrobo Andrés Felipe Meneses Paz
Actor:	Usuario
Descripción:	Este caso de uso es iniciado por el usuario, mediante este caso de uso el sistema le permite al usuario realizar la configuración de las características de la población para cada zona geográfica del mapa

	escogido.								
Precondiciones:	1. Sistema activo. 2. Caso de uso escoger mapa.								
Poscondiciones:	Realización de la configuración de población de las zonas geográficas.								
Prioridad:	Alta								
Flujo normal de eventos:	<table border="0"> <tr> <td>Usuario</td> <td>Sistema</td> </tr> <tr> <td>1. Solicita configurar población de zonas.</td> <td>2. Solicita para la primera zona geográfica, los porcentajes de la población según grupos de edad, factores de riesgo y genero (variables de estado interno del habitante capítulo 3).</td> </tr> <tr> <td>3. Introduce los datos solicitados para la zona geográfica.</td> <td>4. Verifica que los datos introducidos sean validos. 5. Verifica que los datos introducidos para grupos de edad sumen 100. 6. Verifica que los datos introducidos para género sumen 100. 7. Almacena los datos introducidos para la zona</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Los eventos 2 a 7 se realizan para cada zona geográfica.</td> </tr> </table>	Usuario	Sistema	1. Solicita configurar población de zonas.	2. Solicita para la primera zona geográfica, los porcentajes de la población según grupos de edad, factores de riesgo y genero (variables de estado interno del habitante capítulo 3).	3. Introduce los datos solicitados para la zona geográfica.	4. Verifica que los datos introducidos sean validos. 5. Verifica que los datos introducidos para grupos de edad sumen 100. 6. Verifica que los datos introducidos para género sumen 100. 7. Almacena los datos introducidos para la zona	Los eventos 2 a 7 se realizan para cada zona geográfica.	
Usuario	Sistema								
1. Solicita configurar población de zonas.	2. Solicita para la primera zona geográfica, los porcentajes de la población según grupos de edad, factores de riesgo y genero (variables de estado interno del habitante capítulo 3).								
3. Introduce los datos solicitados para la zona geográfica.	4. Verifica que los datos introducidos sean validos. 5. Verifica que los datos introducidos para grupos de edad sumen 100. 6. Verifica que los datos introducidos para género sumen 100. 7. Almacena los datos introducidos para la zona								
Los eventos 2 a 7 se realizan para cada zona geográfica.									
Flujos alternativos:	FA1 Operación cancelada El usuario en cualquier momento puede cancelar la operación								
Excepciones:	Error en los datos ingresados por el usuario Desplegar error de datos no validos								
Requerimientos especiales:	Para el evento 7 es necesario utilizar un mecanismo de persistencia								

Nombre:	Configurar grupos de edad contagiosos				
Autores:	Angela Johana Muñoz Idrobo Andrés Felipe Meneses Paz				
Actor:	Usuario				
Descripción:	Es iniciado por el usuario, mediante este caso de uso el sistema le permite al usuario realizar la configuración de los grupos de edad de los habitantes, como contagiosos o no contagiosos.				
Precondiciones:	Sistema activo				
Poscondiciones:	Realización de la configuración de grupos de edad contagiosos				
Prioridad:	Alta				
Flujo normal de eventos:	<table border="0"> <tr> <td>Usuario</td> <td>Sistema</td> </tr> <tr> <td>1. Solicita configurar grupos de edad contagiosos</td> <td>2. Solicita habilitar los grupos de edades que el usuario desea sean</td> </tr> </table>	Usuario	Sistema	1. Solicita configurar grupos de edad contagiosos	2. Solicita habilitar los grupos de edades que el usuario desea sean
Usuario	Sistema				
1. Solicita configurar grupos de edad contagiosos	2. Solicita habilitar los grupos de edades que el usuario desea sean				

	contagiosos 3. Habilita como contagiosos a los grupos de edad deseados 4. Almacena los grupos de edad de contagiosos
Flujos alternativos:	FA1 Operación cancelada El usuario en cualquier momento puede cancelar la operación
Excepciones:	
Requerimientos especiales:	Para el evento 4 es necesario utilizar un mecanismo de persistencia

Nombre:	Configurar zona critica
Autores:	Angela Johana Muñoz Idrobo Andrés Felipe Meneses Paz
Actor:	Usuario
Descripción:	Este caso de uso es iniciado por el usuario, le permite configurar la dimensión del área para una zona critica y la cantidad de enfermos que permiten considerar esa área como una zona critica
Precondiciones:	Sistema activo
Poscondiciones:	Configuración aceptada por el sistema
Prioridad:	Alta
Flujo normal de eventos:	Usuario Sistema 1. Solicita configurar zona critica 2. Solicita los datos para la zona critica 3. Introduce los datos (Área y cantidad mínima de enfermos en el área)
Flujos alternativos:	FA1: cancelación de la solicitud configurar zonas. en el evento 3
Excepciones:	Fallo en los datos introducidos Despliega error en los datos introducidos
Requerimientos especiales:	

Nombre:	Simular
Autores:	Angela Johana Muñoz Idrobo Andrés Felipe Meneses Paz
Actor:	Usuario
Descripción:	Es iniciado por el usuario, permite la realización de una simulación durante el tiempo establecido por el usuario.
Precondiciones:	1. Sistema activo. 2. Caso de uso ubicar enfermos
Poscondiciones:	1. Archivo de habitantes resultantes creado en una ruta determinada 2. Despliegue del resultado de la simulación en el mapa
Prioridad:	Alta
Flujo normal de	Usuario Sistema

eventos:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Solicita establecer el tiempo de la simulación 2. Solicita el tiempo de simulación 3. Ingresa el tiempo de simulación 4. Verifica que el dato ingresado sea valido 5. Verifica que el dato ingresado sea mayor a cero y menor a un año 6. Solicita iniciar simulación 7. Almacena persistentemente a los habitantes enfermos iniciales, ubicados en el mapa, en un archivo 8. Identifica las configuraciones necesarias para una simulación configuración de cambios de estados, de población de zonas, de grupos de edad contagiosos y la ruta del archivo del mapa a utilizar 9. Identifica la ruta del archivo del mapa a utilizar 10. Crea el ambiente para cada habitante enfermo inicial 11. Crea a los habitantes del ambiente 12. Ubica a los habitantes en el ambiente 13. Organiza las acciones (comportamiento e interacción) que ejecutaran los habitantes 14. Ejecuta las acciones de los habitantes 15. Caso de uso terminar simulación
Flujos alternativos:	<p>FA1 Configuraciones y/ o ruta de mapa no identificados en el evento 8 El sistema informa cuales configuraciones no han sido realizadas y pregunta si el usuario desea utilizar las configuraciones por defecto El usuario acepta utilizar las configuraciones por defecto Eventos 10 - 14</p> <p>FA2 Configuraciones y/ o ruta de mapa no identificados en el evento 8 El sistema informa cuales configuraciones no han sido realizadas y pregunta si el usuario desea utilizar las configuraciones por defecto El usuario no acepta utilizar las configuraciones por defecto El sistema abandona el caso de uso</p>
Excepciones:	
Incluye	Caso de uso terminar simulación
Requerimientos especiales:	Para los eventos 10 - 14 es necesario trabajar con un API especializada en simulaciones de modelos basados en agentes o

	individuos
	Para el evento 7 es necesario utilizar un mecanismo de persistencia

3.2 MODELO DE ANALISIS

3.2.1 PAQUETES DE ANÁLISIS

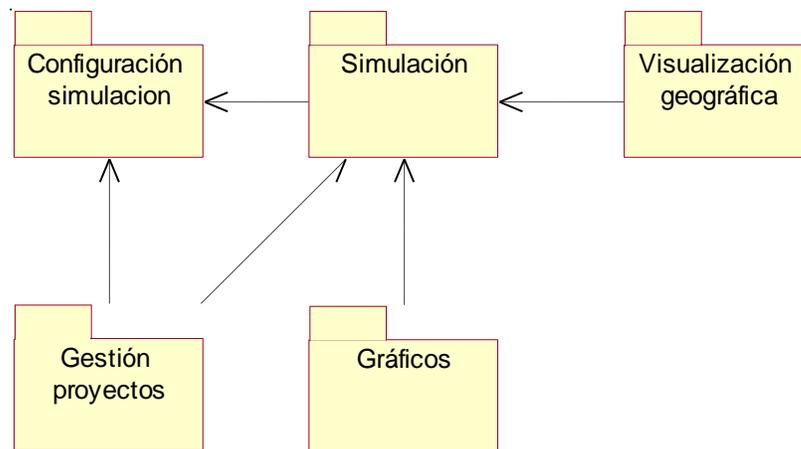


Fig. 4. 4 Diagrama de paquetes

Estos paquetes son los responsables de las funcionalidades expresadas en los casos de uso; y están relacionados, paquetes y casos de uso, de la siguiente manera:

Configuración simulación

- Configurar cambios de estado
- Configurar población de zonas
- Configurar grupos de edad contagiosos
- Configurar zona critica
- Escoger mapa

Simulación

- Cargar mapa

Ubicar enfermos

Simular

Detener simulación

Continuar simulación

Terminar simulación

Simular desde SIG

Visualización geográfica

Visualizar resultados de simulación

Gestión proyectos

Guardar proyecto

Abrir proyecto

Gráficos

Graficar resultados

4 HERRAMIENTAS TECNOLOGICAS EMPLEADAS PARA LA IMPLEMENTACION DEL SIMULADOR DE DIFUSION DE LA TUBERCULOSIS

4.1 TECNOLOGIA JAVA

En el proceso de desarrollo para el Simulador de difusión de la tuberculosis (SimTB) identificamos tres necesidades: (1) la implementación del modelo basado en individuos de difusión de la TB, (2) persistencia de los datos necesarios para la realización de simulaciones, persistencia que permite al usuario realizar simulaciones a partir de una configuración guardada anteriormente o a partir de los resultados de una simulación y (3) la visualización espacial de la simulación, en un mapa geográfico.

La tecnología escogida para la implementación de la aplicación fue Java, tecnología constituida por el lenguaje de programación Java y por una selección de plataformas especializadas, la plataforma utilizada fue Java 2 SDK, Standard Edition (J2SE) versión 1.4.2_04, plataforma que provee un ambiente completo para el desarrollo de aplicaciones de escritorio (caso de interés) y servidores. Se eligió la tecnología Java, debido a la experiencia que ya se tenía en el diseño y la implementación de aplicaciones con ella, por la existencia de APIs (Application Program Interfaces) escritas en el lenguaje de programación Java, útiles para satisfacer las necesidades mencionadas anteriormente y por ser una tecnología libre para descargar y usar en programación académica y comercial.

4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO BASADO EN INDIVIDUOS DE DIFUSIÓN DE LA TB

En la actualidad existen varias herramientas para implementar modelos basados en individuos o agentes, algunas *open source* como ABLE, breve, Cougaar, EVO, JADE, JAS, MASON, Quicksilver, RePast, SIM_AGENT, SeSAm, SimPy, Swarm, Zeus, otras

freeware como Ascape, NetLogo, StarLogo, StarLogoT y otras *software propietario* como, AgentSheets, iGEN, AnyLogic.

La herramienta escogida para la implementación del modelo basado en individuos de difusión de la TB fue Swarm en su versión estable 2.1.1, se le eligió por ser una herramienta open source, porque utiliza para la implementación de modelos basados en individuos al lenguaje de programación Java, entre otros lenguajes y por el conocimiento y la experiencia del GTI (Grupo de Tecnologías de la información, departamento de sistemas, Unicauca) en el trabajo con ella.

4.2.1 SWARM

Swarm es un paquete software para simulación multi-agente de *sistemas complejos*, permite el desarrollo de aplicaciones para realizar simulaciones que involucran un gran número de agentes con un comportamiento propio y que interactúan unos con otros de manera concurrente; fue originalmente desarrollado en el instituto Santa Fe. Swarm pretende ser una herramienta útil para investigadores de distintas disciplinas. La funcionalidad básica de Swarm es la simulación de colecciones de agentes que interactúan concurrentemente, con Swarm se puede implementar una gran variedad de modelos basados en agentes. El software Swarm esta disponible al público en general bajo los términos de la licencia GNU. Swarm es software experimental, lo cual significa que es suficientemente completo para ser funcional pero siempre estará bajo desarrollo; la anterior es la descripción de Swarm en http://www.swarm.org/wiki/Introduction_to_Swarm

El paquete Swarm se encuentra disponible para Java, Objective C y Scheme, este paquete esta conformado por librerías y de cada librería se pueden escoger diferentes características. Como se menciona anteriormente, Java fue la tecnología escogida para la construcción de SimTB por lo tanto para la implementación del modelo basado en individuos de difusión de la TB, se utilizo Swarm para Java. Las librerías de Swarm están escritas en el lenguaje de programación Objective C pero el paquete de Swarm para Java permite utilizar estas librerías al reflejar los protocolos (término propio de Objective C, análogo al término interface de Java) de las librerías como interfaces Java. En adelante cuando se mencione al paquete Swarm se estará haciendo referencia a Swarm para Java.

Modelos basados en agentes y Swarm

En los modelos basados en agentes se manejan términos como Agente, Estado, Comportamiento, Interacciones y Ambiente para agentes; para la implementación de uno de estos modelos con Swarm, el desarrollador de la aplicación debe diseñar e implementar clases para los agentes, los *objetos* instanciados de estas clases, representarán a los *agentes*, algunas de las *variables de instancia* y de los *métodos* de estas clases constituirán, respectivamente, el *estado* y el *comportamiento y/o interacciones* de los agentes; y el *ambiente* de los agentes será representado por *clases espaciales discretas de dos dimensiones* que sirven como contenedores para los agentes.

Las aplicaciones Swarm son estructuradas alrededor del concepto *swarm*, pueden contener uno, dos o más swarms. Un swarm es un conjunto de objetos y un horario (que a su vez es otro objeto) de mensajes o acciones para esos objetos. Las aplicaciones generalmente contienen dos swarms: el swarm modelo (model swarm) y el swarm observador (observer swarm), el desarrollador representa al swarm modelo creando una clase que se extienda de SwarmImpl y al swarm observador con otra clase que se extienda de GUISwarmImpl. SwarmImpl y GUISwarmImpl son clases contenidas en las librerías de Swarm. Los swarms son asociados jerárquicamente, así, se tiene un swarm de nivel mas alto que contiene al de nivel inferior y así sucesivamente.

Swarm modelo

Este swarm es utilizado para encapsular el modelo que se desea simular; los objetos del swarm modelo (agentes, espacio o mundo para ubicar a los agentes...) representan a los componentes del fenómeno o sistema que se esta modelando y el horario organiza las acciones que deben realizar estos objetos, para que ocurran en los pasos de tiempo apropiados, según el diseño del desarrollador. Un swarm modelo tiene un conjunto de entradas y salidas, las entradas pueden ser: el tamaño del mundo, el número de agentes y las salidas pueden ser los agentes y su distribución en el mundo.

Swarm observador

El swarm modelo define el modelo que se quiere simular, pero en el estudio de un fenómeno o sistema, también es necesario contar con instrumentación que permita ingresar las entradas del modelo, interactuar con el (iniciar, parar, terminar el modelo) y observar sus salidas. En las simulaciones Swarm, esos objetos de instrumentación son ubicados en un swarm observador. El swarm observador incluye dentro de sus objetos al mismo swarm modelo y a los objetos de instrumentación. Los objetos de instrumentación del swarm observador son usados en gran parte como interfaces de usuario, estos objetos pueden ser: ventanas para entrada y observación de datos (Probes), cuadrículas o grillas de visualización de la simulación (Raster), que representen a los agentes en su mundo, gráficos de líneas (EzGraphs) o histogramas (EzBin) y un panel de control para la simulación, con 5 botones que permiten iniciar, parar, dar un paso de simulación, guardar y salir. Estos objetos interactúan con el swarm modelo permitiendo que el usuario de la aplicación Swarm pueda observar el fenómeno de estudio en frente del computador.

Así como el swarm modelo, el swarm observador también tiene objetos, un horario de acciones para esos objetos y un conjunto de entradas y salidas. Las entradas del swarm observador son configuraciones para los objetos de observación o instrumentación, por ejemplo la definición de los campos para una ventana de entrada y observación de datos, los colores deseados para la visualización de la simulación ó que tipo de graficas realizar. Y las salidas, son las observaciones o visualizaciones del fenómeno de estudio, que el usuario obtendrá.

La Fig.5.1 ilustra las definiciones anteriores:

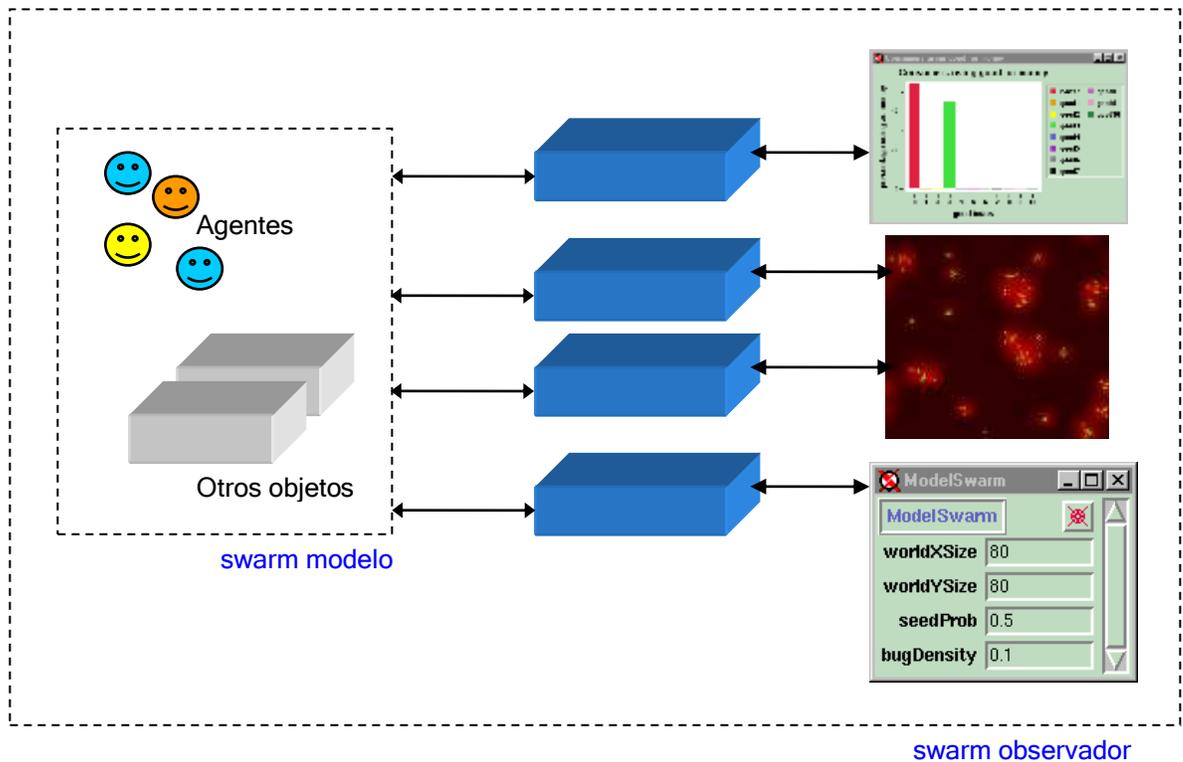


Fig. 5. 1. Swarm observador y swarm modelo

El panel de control que suministra un swarm observador, viene empotrado en la clase padre GUISwarmImpl, la Fig.5.2. muestra su apariencia.



Fig. 5. 2, Panel de control

Como se observa en la figura, este panel de control es muy simple, y solo permitiría que el usuario inicie los casos de uso relacionados con la ejecución de una simulación (Simular, Detener simulación, Continuar simulación, Terminar simulación, capítulo 4). El Simulador de difusión de la TB tiene definidos otros casos de uso relevantes: los relacionados con la

configuración de la simulación y la gestión de proyectos, los objetos de instrumentación y el panel que ofrece un swarm observador no son adecuados para que el usuario inicie todos estos casos de uso, por esta razón se implemento una interfaz distinta para el Simulador de difusión de la TB (Fig.), todos los componentes y acciones de la interfaz fueron implementados con los apis Swing y AWT de Java.

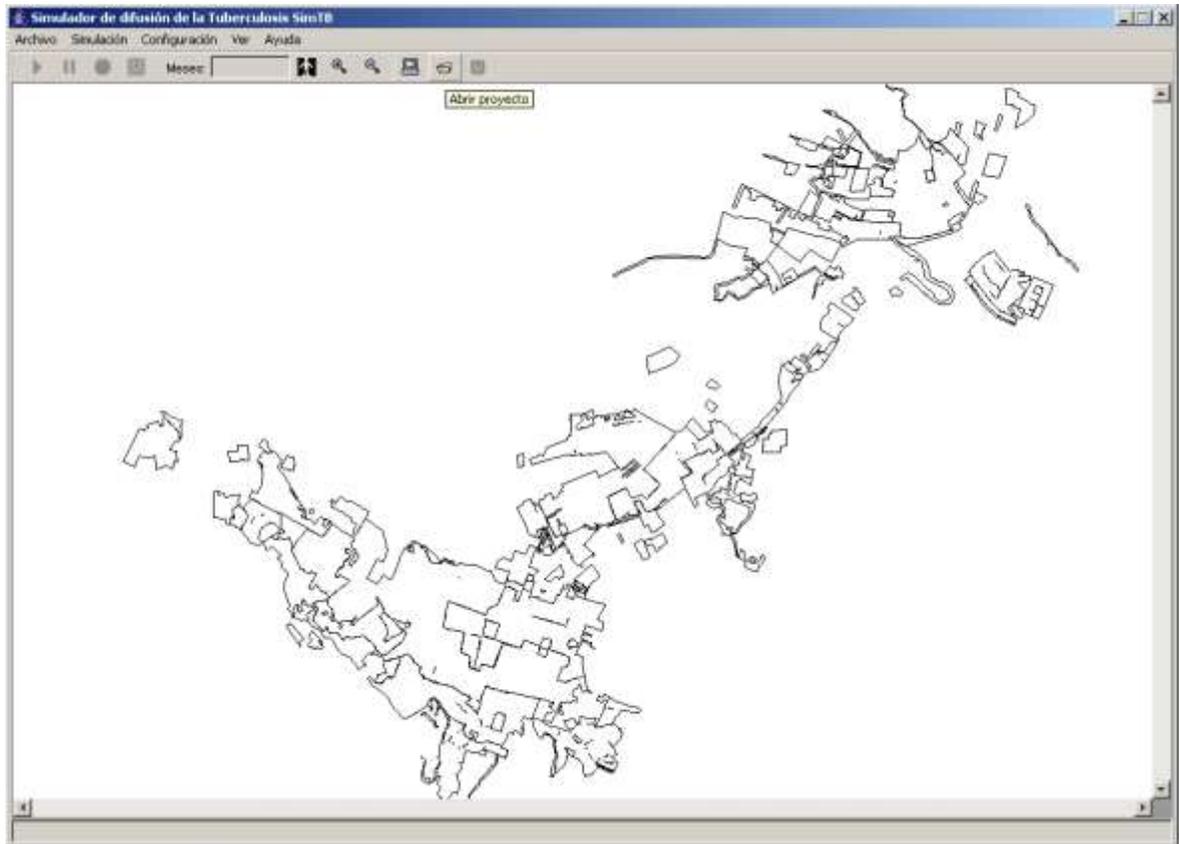


Fig. 5. 3, Interfaz SimTB

El procedimiento regular para la construcción de un swarm, consiste en los siguientes tres pasos:

- Construir los objetos del swarm. El desarrollador implementa un método usualmente denominado, `construirObjetos` (`buildObjects`), en la clase que representa al swarm.
- Definir las acciones que serán enviados a los objetos del swarm y crear un horario para esas acciones. Mediante los acciones, el desarrollador modela el comportamiento deseado para los objetos y el horario le permite programar como

ocurren en el tiempo estas acciones o mensajes. Una simulación Swarm ocurre en pasos de tiempo discretos, el horario define el efecto del paso del tiempo en el modelo. El método correspondiente a este paso es usualmente denominado `construirAcciones` (`buildActions`).

- Y finalmente formar un paquete denominado `Activity`, que permita correr la simulación Swarm. Esto se realiza mediante el método, denominado generalmente, `activarEn` (`activateIn`). Este método retorna un objeto de tipo `Activity`, objeto ejecutable que contiene las acciones y el horario del paso anterior, junto con algunos objetos que Swarm adiciona.

Como se mencionó anteriormente los swarms son jerárquicos, los sub-swarms (como `swarm modelo`) operan dentro de otros swarms (`swarm observador`), esto ocurre mediante los métodos `activarEn` de cada swarm: a `activarEn` se le da un contexto, este contexto es el swarm dentro del cual será ejecutado el objeto de tipo `Activity` resultante, en términos de codificación, al método `activarEn` se le pasa como argumento un swarm. Para el swarm de nivel más alto el contexto será nulo, indicando que es el swarm más alto en la jerarquía, para un sub-swarm el contexto será el swarm que lo contiene. Dentro de cada método `activarEn`, se activa el horario del swarm, en el contexto del propio swarm.

El objeto de tipo `Activity` que retorna el método `activarEn`, del swarm de más alto nivel, tiene asociados todos los horarios: los horarios de los sub-swarms y su propio horario, de esta manera con la ejecución de este objeto, se ejecutan jerárquicamente las acciones de cada swarm, desde el nivel más bajo hasta el más alto, en cada paso de tiempo de una simulación. La Fig. 5.4 presenta una jerarquía de swarms y la asociación de sus horarios.

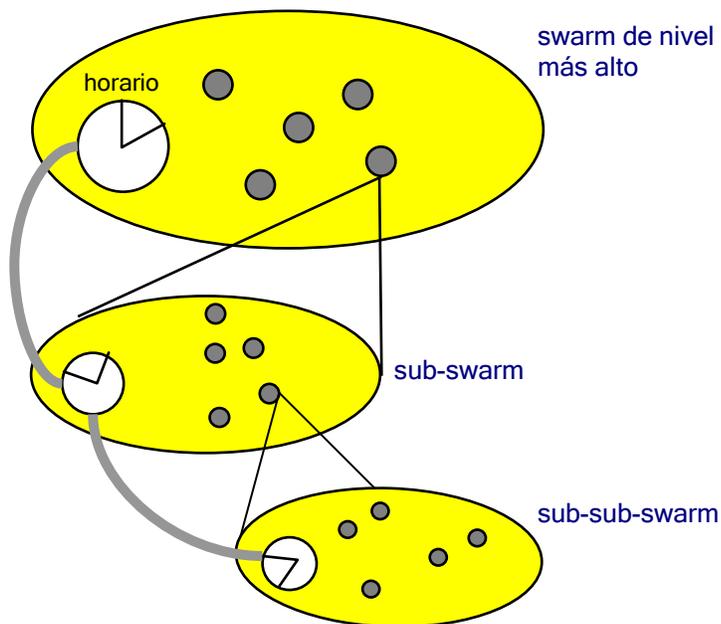


Fig. 5. 4, Jerarquía de swarms

La terminología de los swarm y sus métodos no es requerida en Swarm pero su uso facilita entender la mayoría de aplicaciones.

Ejecución de una simulación Swarm

El programa principal o main que permite iniciar una aplicación Swarm típica, tiene los siguientes pasos:

- Instanciación de un swarm observador.
- Invocación del método `construirObjetos` del swarm observador, este método creará una instancia de swarm modelo y mediante esta instancia invocará a `construirObjetos` de swarm modelo (así se crearán los agentes y su espacio), y además creará los objetos de instrumentación (panel de control, ventanas de datos, visualización, graficas).
- Invocación del método `construirAcciones` del swarm observador, este método invocará a `construirAcciones` del swarm modelo (así se creara el horario del swarm

modelo), definirá los mensajes o acciones para los objetos de instrumentación y creará el horario para estos objetos.

- Invocación del método `activarEn` del swarm observador, dentro de este método primero se invocará a `activarEn` del swarm modelo, de esta manera se activará el horario de swarm modelo y el objeto de tipo `Activity` de swarm modelo quedará asociado al contexto del swarm observador, después se activa el horario del swarm observador y se retorna el objeto `Activity` de más alto nivel, que se manipulara, a través de los eventos del usuario en el panel de control.
- Despliegue del panel de control.

Clases e interfaces de Swarm

Algunas de las clases e interfaces, más relevantes de Swarm, se describen a continuación:

Swarm:

Esta interface representa el concepto de un swarm, concepto que se mencionó anteriormente. Tiene dos clases de implementación conocidas: `SwarmImpl` y `GUISwarmImpl`.

SwarmImpl:

Los swarms modelo que se crean en las aplicaciones son subclases o extensiones de la clase `SwarmImpl` y heredan de ella métodos muy útiles.

GUISwarmImpl:

Los swarms observador que se crean en las aplicaciones son extensiones de esta clase.

Zone:

Es una interface definida como una unidad modular de asignación de almacenamiento. Cada vez que un nuevo objeto es creado, se debe identificar una zona a partir de la cual se obtenga almacenamiento para las variables de instancia u otros datos internos del objeto. Un programa puede establecer múltiples zonas para asegurar que objetos con un tiempo de vida similar o necesidades de almacenamiento similares sean ubicados juntos y en general para optimizar la asignación y reuso de almacenamiento. Una zona mantiene

una colección de todos los objetos asignados a ella. Cuando se elimina (drop) una zona, automáticamente se liberan las asignaciones de espacio de todos los objetos dentro de ella. Cuando se quiere crear una nueva zona debe identificarse otra zona existente que le proporcione almacenamiento a la nueva zona, ninguna nueva zona puede ser creada a menos que ya existan algunas zonas, Swarm tiene dos zonas predefinidas, ellas son: globalZone y scratchZone. ZoneImpl es la clase de implementación conocida de esta interface.

Globals:

Globals es una clase que toda aplicación Swarm debe utilizar. No es instanciada por el desarrollador, solo es usada como clase. Contiene una variable static denominada “env”, esta variable es una instancia de la clase SwarmEnvironment.

SwarmEnvironment:

La clase SwarmEnvironment contiene objetos y métodos útiles a lo largo de una aplicación Swarm. Algunos de los más relevantes son:

- initSwarm: el método de activación de Swarm, establece variables y métodos que son utilizados a lo largo de una aplicación Swarm, esta es la primera llamada que cualquier simulación Swarm debe hacer.
- globalZone: todos los objetos Swarm deben ser puestos en una zona. La variable globalZone es de tipo Zone. Al inicio del modelo se puede usar globalZone, después se pueden crear nuevas subzonas.
- uniformIntRandom: esta variable es de tipo UniformIntegerDist que es un generador de valores unitarios uniformemente distribuidos en un intervalo cerrado.

Grid2d:

La interface Grid2d es un contenedor para representar posiciones de agentes en una cuadrícula de dos dimensiones. En una posición de la cuadrícula solo se puede almacenar un objeto, no tiene implícitas condiciones sobre sus posiciones límites. Su clase de implementación es Grid2dImpl.

List:

Es una colección extensible de ítems que tienen un orden. Los ítems pueden ser insertados en cualquier punto. Su clase de implementación es ListImpl, esta clase se usa habitualmente para agrupar objetos de interés, por ejemplo agentes.

ActionGroup:

Esta interface es básicamente un contenedor especializado, diseñado para mantener mensajes destinados para otros objetos. ActionGroupImpl es una clase de implementación para esta interface, se usa principalmente para guardar los mensajes que se desea enviar a los agentes y al swarm modelo, para que se comporten según el diseño del desarrollador. Antes de que un mensaje pueda ser insertado en un ActionGroupImpl, el mensaje debe ser encapsulado en otro objeto de tipo Selector.

Selector:

Esta clase encapsula un mensaje para que pueda ser guardado en un ActionGroupImpl. Un mensaje o acción se especifica con el nombre del mensaje, es decir, con el nombre del método que ejecuta la acción que el desarrollador desea y con el nombre de la clase en la cual está definido ese método. Los selectors son una noción de Objective C por esta razón no soportan polimorfismo para los métodos asociados con los mensajes.

Schedule:

Interface que organiza los mensajes del ActionGroupImpl para que se envíen en el momento apropiado. ScheduleImpl es una clase de implementación de esta interface.

Activity :

El último paso para la construcción de un swarm es unir todas las piezas (objetos y grupo de mensajes) en un paquete que pueda ser ejecutado. Esto se hace por medio del método activarEn de un swarm, este método retorna un objeto ejecutable de tipo Activity. Activity contiene los métodos necesarios para correr, dar un paso de simulación, terminar una simulación.

4.3 PERSISTENCIA DE DATOS

En el capítulo 4 se mencionó que el modelo basado en individuos de difusión de la TB requiere las siguientes configuraciones: configuración de cambio de estados de un individuo, configuración de la población de las zonas geográficas y configuración de los individuos contagiosos según grupos de edad, los datos de estas configuraciones deben ser almacenados de alguna forma, para que se pueda acceder a ellos en una simulación. Además, para iniciar una simulación, deben estar almacenados los datos de los habitantes con los cuales se desea iniciar la simulación. Y por último, también es necesaria la persistencia de los datos de los habitantes resultantes de una simulación, para permitir su visualización y análisis o clasificaciones posteriores de los datos de dichos habitantes.

Para almacenar los datos de las configuraciones, de los habitantes iniciales y de los resultantes se tenían dos opciones: una base de datos o documentos XML (eXtensible Markup Language). El almacenamiento de datos en documentos XML se justifica en sistemas con cantidades pequeñas de datos, pocos usuarios y requerimientos de ejecución modestos, una base de datos se utiliza generalmente en sistemas con características opuestas. En SimTB, la cantidad de datos que se deben manejar es pequeña, no se necesita que los datos sean accedidos por múltiples usuarios y los requerimientos en cuanto a rendimiento o ejecución son modestos, no es un requerimiento que el sistema acceda a los datos necesarios a gran velocidad. Por estas razones para el almacenamiento de los datos de SimTB no se utilizó una base de datos, se utilizaron documentos XML. Para la creación, lectura y manipulación de estos documentos XML, se usó la API JDOM.

4.3.1 JDOM

JDOM es un API con licencia open source, que permite leer, crear y manipular documentos XML de una manera sencilla y muy intuitiva para cualquier programador en Java, a diferencia de otras APIs como DOM y SAX, las cuales se idearon sin pensar en ningún lenguaje en concreto, resultando incomodo utilizarlas directamente.

DOM y SAX son dos especificaciones, las implementaciones de dichas especificaciones son los parsers. Existen numerosos parsers XML, dentro de los cuales están Crimson y Xerces, ambos de la Fundación Software Apache, open source y ampliamente usados en la industria, también han sido desarrollados parsers XML comerciales, por compañías como Oracle e IBM. La mayoría de los parsers pueden ser usados para que trabajen con cualquiera de dos las especificaciones: DOM y SAX.

La API JDOM no es un parser, usa un parser para su trabajo, JDOM solo aporta una capa de abstracción para la manipulación de documentos XML, facilitando bastante esta tarea.

Clases de JDOM

Las clases más relevantes de JDOM, para la lectura, creación y manipulación de documentos XML son las siguientes:

Document: representa al documento XML.

Element: representa un nodo o etiqueta del documento XML.

Attribute: representa un atributo de un nodo o etiqueta del documento XML.

SAXBuilder y DOMBuilder: permiten construir un Document, si no se especifica el parser que deben usar, usan por defecto el parser Xerces. Un Document puede ser creado en memoria o puede ser construido desde un stream, un fichero o una url. SAXBuilder usa la especificación SAX, DOMBuilder usa DOM.

XMLOutputter: se utiliza para escribir el documento (Document) en un fichero dado.

4.4 VISUALIZACIÓN ESPACIAL DE LA SIMULACIÓN, EN UN MAPA GEOGRÁFICO

De acuerdo al objetivo general de este trabajo de grado, se desea suministrar información acerca de las probables, futuras zonas de mayor prevalencia de tuberculosis, en la ciudad

de Popayán, para el diseño de estrategias de prevención. Entonces, es necesario que los resultados de una simulación permitan identificar dichas zonas.

Como se mencionó en la sección acerca de Swarm, lo usual en una aplicación Swarm, es utilizar objetos de instrumentación que permitan ingresar las entradas del modelo, interactuar con el y observar sus salidas o resultados. Los objetos de instrumentación que permiten visualizar los resultados de una simulación son grillas, gráficos de líneas y/o histogramas.

Los objetos que representan entidades del modelo de estudio, en una aplicación Swarm, como los agentes u otras entidades del mundo de los agentes, son contenidos en otro tipo de objeto: Grid2dImpl, que representa un espacio de dos dimensiones, por esta razón frecuentemente se usa una cuadrícula o grilla de dos dimensiones para desplegar lo que ocurre con los agentes, en ese espacio de dos dimensiones. Para el despliegue de una simulación en una grilla, se configuran distintos colores que identifiquen la presencia de un agente, su estado o la presencia de alguna característica del mundo del agente, de esta forma los colores presentados en la grilla, al final de la simulación, permiten observar los resultados del modelo en cuestión, por ejemplo si el color rojo representa a enfermos de TB, las porciones de grilla con mayor concentración de color rojo serían las zonas de mayor prevalencia.

Con el fin de conocer cuales serían las posibles zonas críticas, es decir con mayor número de enfermos, en una ciudad, se puede notar la necesidad, de asociar las porciones de grilla con mayor concentración de color rojo, con zonas geográficas reales. Esa asociación podría realizarse de diversas formas, una de ellas consistiría en la división de la grilla en secciones, para que cada sección represente a una zona geográfica, las zonas geográficas se definen de acuerdo a la unidad espacial de interés, en nuestro caso: el estrato, de esta manera las secciones de la grilla representarían a los estratos. Para que el usuario pueda identificar a que estrato corresponde cada sección, las secciones de la grilla podrían ser visualizadas con colores diferentes. El tamaño de cada sección dependería de las decisiones de diseño de la aplicación Swarm, por ejemplo, si se ha decidido que una sección represente la extensión de una zona geográfica o si las celdas de una sección representan, el número de habitantes de una zona geográfica.

El despliegue de los resultados de una simulación en gráficos de líneas o histogramas, le permite observar al usuario el aumento o disminución de características del modelo basado en agentes como pueden ser: el número total de agentes, el número de agentes que se encuentren en un estado específico, el número de agentes pertenecientes a una zona específica o el número de agentes de un estado y zona específicos.

La visualización de los resultados de una simulación en gráficos de líneas, histogramas o en una grilla, aun identificando secciones de la grilla como zonas geográficas, no le permite al usuario de la simulación, observar los resultados de la simulación en un contexto conocido por el, con el cual identifique directamente la ubicación geográfica de las zonas más críticas, este contexto del que hablamos puede ser un mapa geográfico de la ciudad. Por esta razón, SimTB visualiza la simulación en un mapa geográfico, permitiendo al usuario observar e interpretar fácilmente los resultados de la simulación. El usuario observa ubicados en el mapa, los posibles nuevos enfermos de TB y las posibles zonas más críticas (con mayor numero de enfermos). Así como la presentación de los enfermos resultantes en un mapa es muy útil para el usuario, la forma mas clara para que el usuario ingrese a los enfermos, que inician una simulación, es ubicando cada enfermo inicial deseado, en el mapa geográfico, asignándole los datos necesarios para un habitante y de esta manera trabaja SimTB.

Para suministrar al usuario, la visualización espacial de las simulaciones, en un mapa geográfico, SimTB puede ser ejecutado desde un Sistema de Información Geográfico (SIG), esta ejecución brinda grandes beneficios al usuario de SimTB, ya que se aprovechan todos los recursos de un SIG, para el despliegue de los resultados de una simulación en un mapa determinado y para el análisis de esos resultados. Pero SimTB fue diseñado para que la visualización espacial de la simulación, en un mapa geográfico, no dependa de otro módulo como un SIG, para suministrar esta funcionalidad fue necesario utilizar una herramienta que permitiera manipular y desplegar mapas geográficos.

La herramienta utilizada fue el API GeoTools. Por medio de las clases de geotools y sus métodos, se pueden crear funcionalidades para la ubicación y visualización de puntos en un mapa geográfico, en nuestro caso los puntos representan a los habitantes enfermos

involucrados en una simulación. Se escogió esta API por ser software libre y para aprovechar la experiencia de algunos grupos de la Facultad de Ingeniería Electrónica que ya habían trabajado o se encontraban trabajando con ella.

4.4.1 GEOTOOLS

GeoTools es una librería Java para manipular y desplegar mapas geográficos. Es usada predominantemente para desplegar mapas interactivos dentro de web browsers sin necesidad de soporte del lado del servidor. Sin embargo, también puede ser usada para desarrollar soluciones basadas en la arquitectura cliente-servidor y aplicaciones standalone o de escritorio, como es nuestro caso.

GeoTools es soportada por una comunidad de usuarios y desarrolladores extensa y diversa que crece continuamente en nuevas direcciones. Su licencia es GNU Lesser General Public License (LGPL), por lo cual GeoTools es una librería open source que puede ser usada y modificada libremente, en cualquier otro código (abierto o propietario). La versión utilizada fue GeoTools 0.8.0, versión estable.

GeoTools despliega y manipula mapas en distintos formatos, uno de los formatos más utilizados es el formato Shapefile de ESRI. Un mapa geográfico en el formato Shapefile esta conformado generalmente por tres archivos, con las siguientes extensiones: .shp, .shx y .dbf, los dos primeros contienen la información geométrica de la geografía del mapa y el ultimo contiene información sobre atributos de las entidades geográficas. El mapa geográfico de la ciudad de Popayán, utilizado en SimTB se encuentra en el formato Shapefile y fue facilitado por el grupo de trabajo del Sistema de información geográfico de la ciudad de Popayán para el control de la Tuberculosis, perteneciente al departamento de Geografía de la Universidad del Cauca.

Clases de GeoTools

A continuación se describen las clases más relevantes para la construcción de una aplicación con GeoTools:

Viewer:

La clase Viewer permite desplegar mapas geográficos en applets y aplicaciones, específicamente, es el componente en el que se visualiza el mapa, es una de las clases más importantes de GeoTools y también es una de las más complejas.

Theme:

En GeoTools, los 'Themes' contienen toda la información relacionada con un conjunto determinado de entidades geográficas, incluyendo colores, datos de atributos, etiquetas y las entidades mismas. En realidad, los Themes no almacenan esta información de manera directa, sino que utilizan una colección de otros objetos, entre los cuales se destacan una capa (Layer) que contiene la geografía misma, un objeto GeoData que contiene la información de un atributo determinado de las entidades geográficas, un Shader (sombreador) que convierte los valores GeoData en colores para efectuar sombreados, un ShadeStyle (que controla como se pintan las entidades). Un objeto Theme es incluido dentro de un objeto Viewer para que pueda ser visualizado.

ShapefileReader:

Esta clase permite leer la información de un Shapefile y construye un objeto "theme" a partir de los datos del Shapefile. Simplifica el proceso de cargar un Shapefile.

Otras clases útiles de GeoTools son: ShapePolygon (para crear polígonos), ShapePoint (para crear puntos), Dbf (para leer de un dbf), geotoolsdbf.WriterDBF (para escribir un dbf).

4.5 ENTORNO DE DESARROLLO

El entorno de desarrollo usado fue NetBeans, versión 3.6, este es un ambiente de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) basado en estándares, escrito en el lenguaje de programación Java. Es un IDE Java multi- plataforma, open source, de alto rendimiento, modular y extensible, que le permite a los programadores acelerar el desarrollo de aplicaciones, servicios web y aplicaciones móviles Java.

NetBeans fue hecho open source por Sun Microsystems, quien sigue siendo el patrocinador del proyecto NetBeans, por su calidad de open source este IDE es libre para uso comercial y no comercial y el código fuente esta disponible.

Dado que NetBeans IDE esta escrito en Java puro, debe correr sobre J2SE versión 1.4 o mayor. Los instaladores de este IDE están disponibles en www.netbeans.org y también como parte de la tecnología Java Bundle: J2SE v 1.4.2_04 SDK with NetBeans 3.6 Bundle, que se puede descargar de <http://java.sun.com/j2se/1.4.2/download.html> .

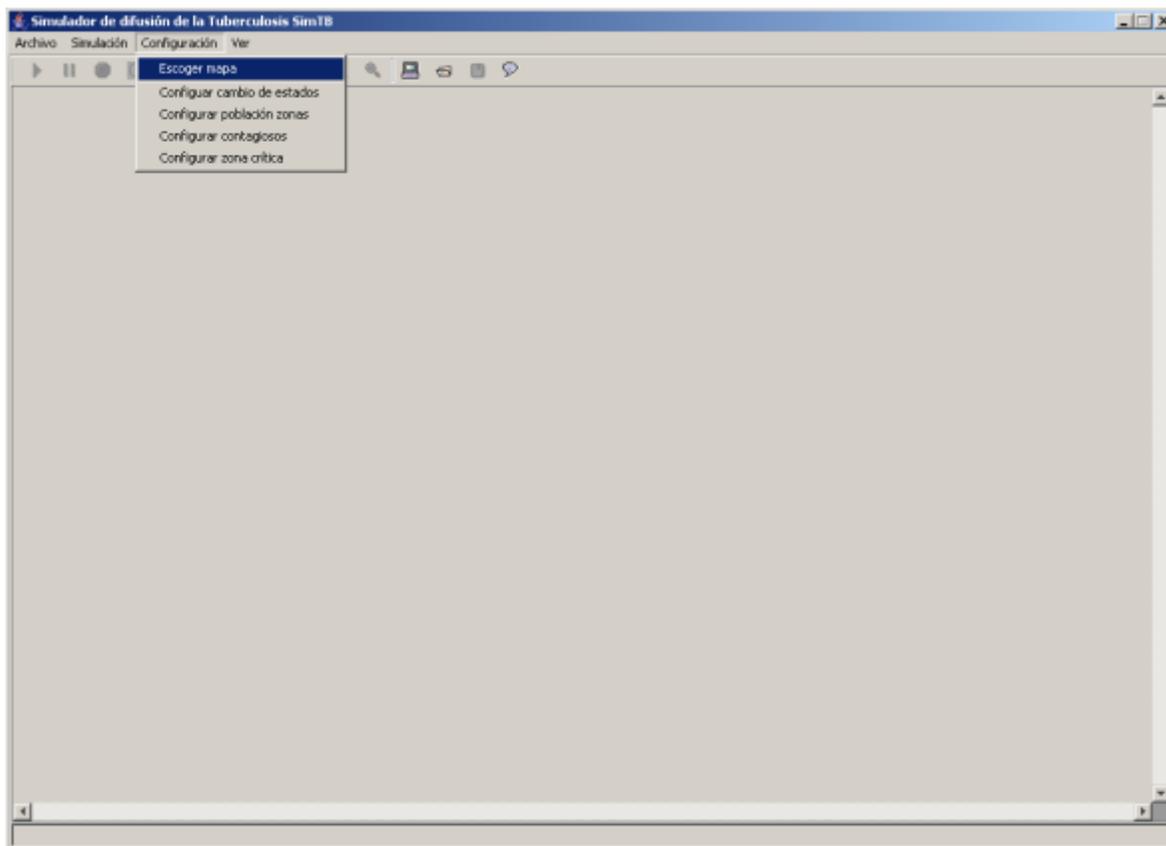
5 EXPERIMENTOS PARA EL SIMULADOR DE DIFUSIÓN DE LA TUBERCULOSIS

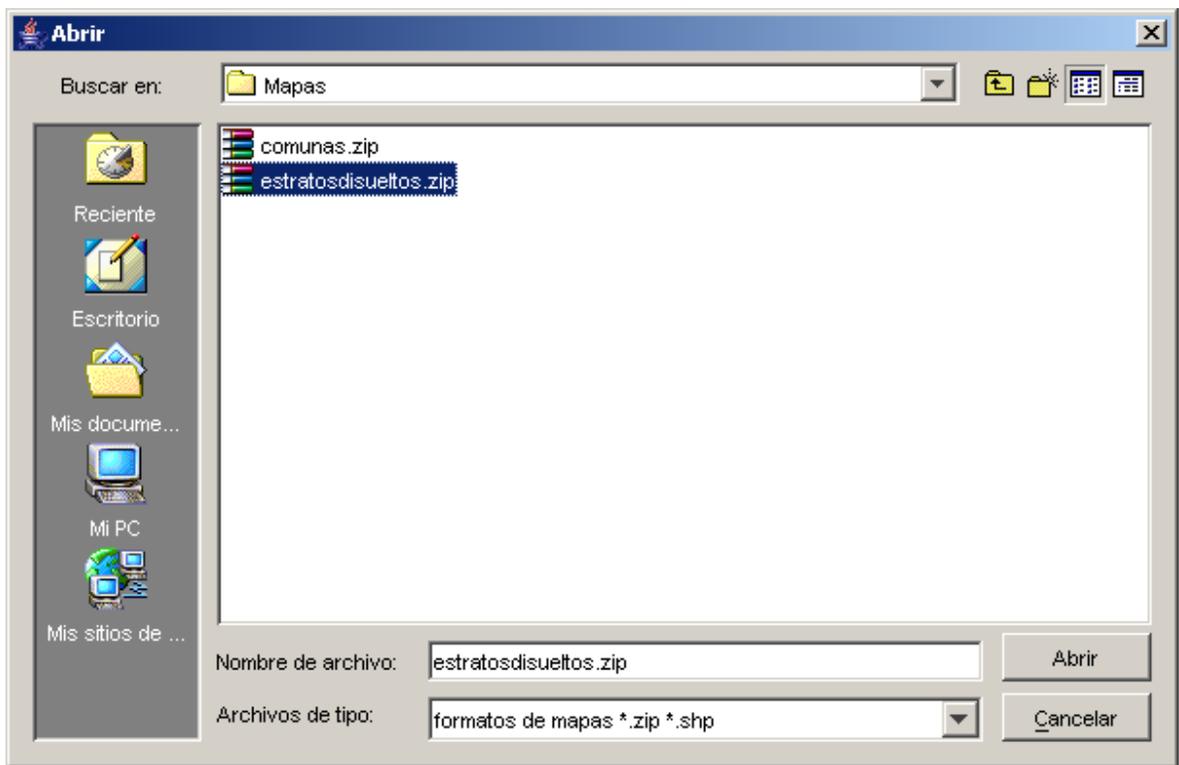
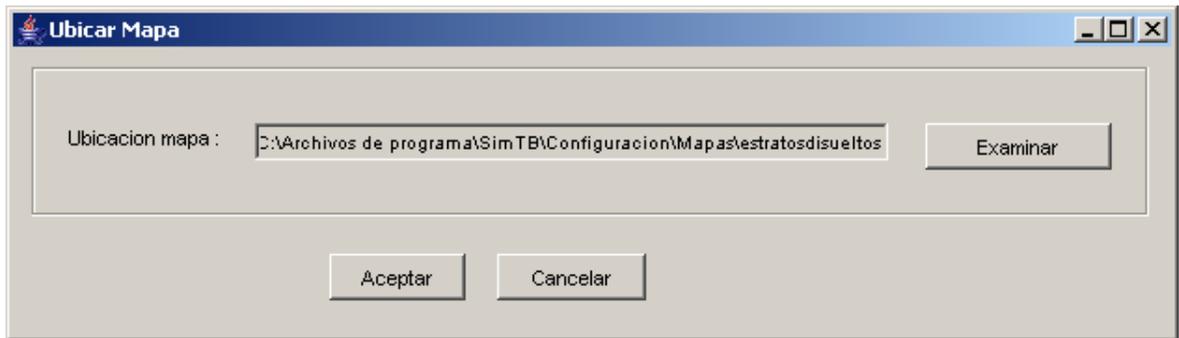
En este capítulo se presentan experimentos realizados con el Simulador de difusión de la tuberculosis y el análisis de los resultados obtenidos. La población de estudio y con la cual se caracterizan las zonas en los experimentos es la población de Popayán en el año 2000.

Antes de presentar los experimentos se muestra la funcionalidad de escoger y cargar el mapa geográfico de estratos de la ciudad de Popayán.

Escoger mapa

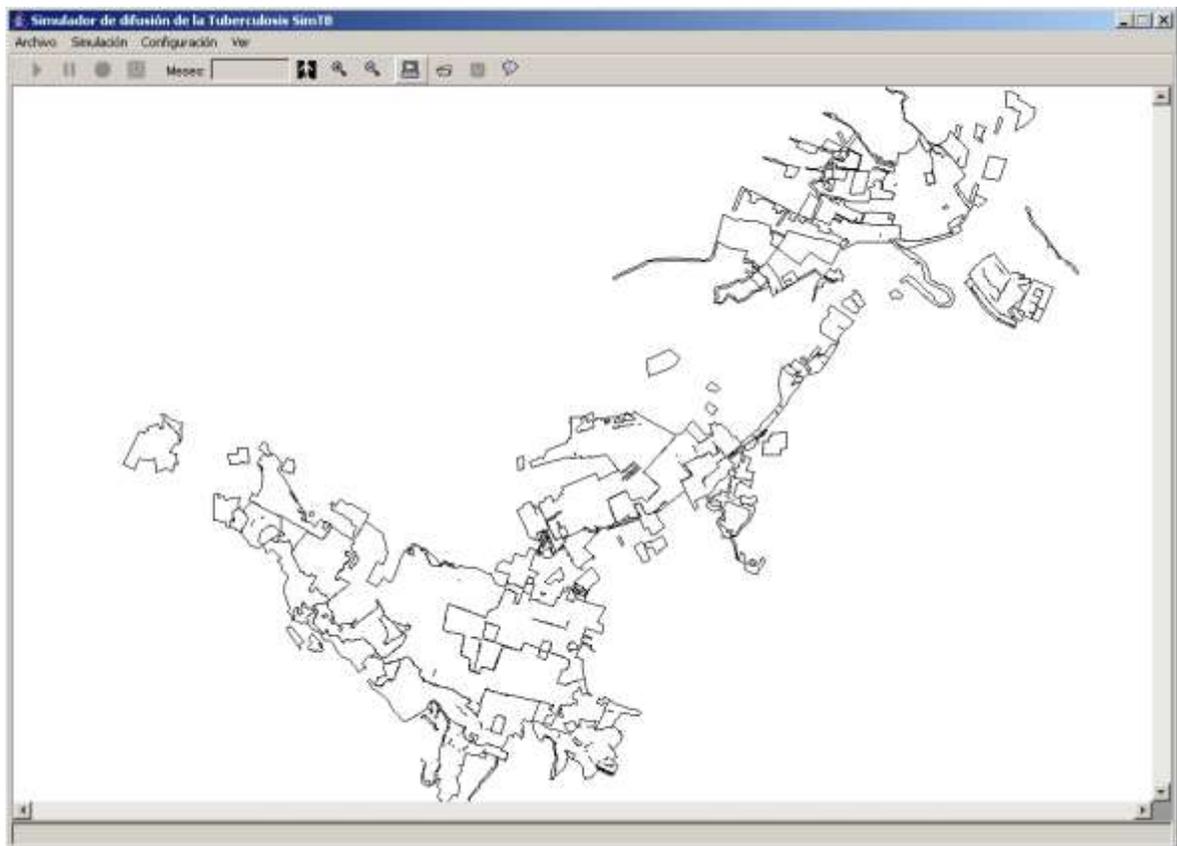
Se inicia mediante el evento de la opción “Escoger mapa” en el menú “Configuración”.





Cargar mapa

El mapa se carga o visualiza con la opción “Nuevo” del menú “Archivo” o con el icono “Nueva simulación” de acceso rápido.



EXPERIMENTO 1

Objetivo

Observar el impacto que producen las variaciones del nivel de un factor de riesgo de la población, en el número de enfermos de tuberculosis resultantes durante una simulación, para un tiempo específico. Considerando como única causa para la infección de habitantes sanos, el contacto con un habitante enfermo y como única causa para el cambio de infectado a enfermo, el factor de riesgo escogido.

Configuraciones

Configuración cambios de estado

Se configuran los cambios de estado sano a infectado e infectado a enfermo. Los demás cambios de estado no se configuran para evitar que el habitante al llegar al estado

enfermo cambie a un estado posterior y de esta manera acumular todos los enfermos que aparecen durante la simulación.

Se deben configurar los intervalos de tiempo durante los cuales se evaluarán los cambios de estado, para todos los casos el intervalo de tiempo de sano a infectado es de 1 a 3 meses y de infectado a enfermo de 2 a 8 meses.

En sano a infectado solo debe configurarse la probabilidad por contacto.

En infectado a enfermo la configuración se realiza de acuerdo a la teoría de la enfermedad y la experiencia de los especialistas, las probabilidades por grupos de edad y género se deben configurar en cero.

Configuración contagiosos

Todos los grupos de edad son habilitados como contagiosos.

Configuración población de zonas

Los porcentajes de los grupos de edad y de género son configurados según los datos de población de la ciudad por grupos de edades y género del año escogido, estos datos pueden ser conseguidos con la información de los censos realizados y/o con proyecciones de los datos de los censos, para el año deseado.

En los porcentajes de factores de riesgo asociados a la enfermedad de la tuberculosis todos los porcentajes a excepción del porcentaje del factor de riesgo de análisis reciben el valor de cero o se dejan en blanco. El factor de riesgo de análisis recibe un valor inicial.

Ejecución

Se ubica un número determinado de enfermos iniciales en una zona.

Se establece el tiempo de simulación.

Se realizan n simulaciones con el valor inicial para el factor de riesgo de análisis, para obtener el número promedio de enfermos resultantes debidos a ese valor.

Se escoge otro valor para el factor de riesgo; las configuraciones, el tiempo establecido y el número de enfermos que inician la simulación permanecen iguales y se realiza de nuevo el experimento. El experimento se realiza según el número de valores que se deseen analizar para el factor de riesgo.

CASO 1: SIDA

Enfermos iniciales=1

Tiempo de simulación=12 meses

Dimensión espacio o grilla = $(12 * 2) + 1 = 25$

Porcentaje de grilla=50%

Población = $25^2 * 50\% = 312.5 = 312$ habitantes

Área de zona crítica = 40000 m²

Cantidad de enfermos que definen una zona crítica = 3

n=30

Los intervalos de tiempo para evaluación de los cambios de estado de interés son configurados según la teoría de la TB y la experiencia de los especialistas.

Probabilidades:

- Sano - Infectado

Contacto=100

- Infectado - Enfermo

Grupos de edad y género sin valores

Factores de riesgo según teoría (probabilidad Sida=0.5)

Porcentajes factor de riesgo sida = 20, 40, 60, 80, 100 %.

Con los resultados obtenidos de la simulación se realizó la siguiente grafica:

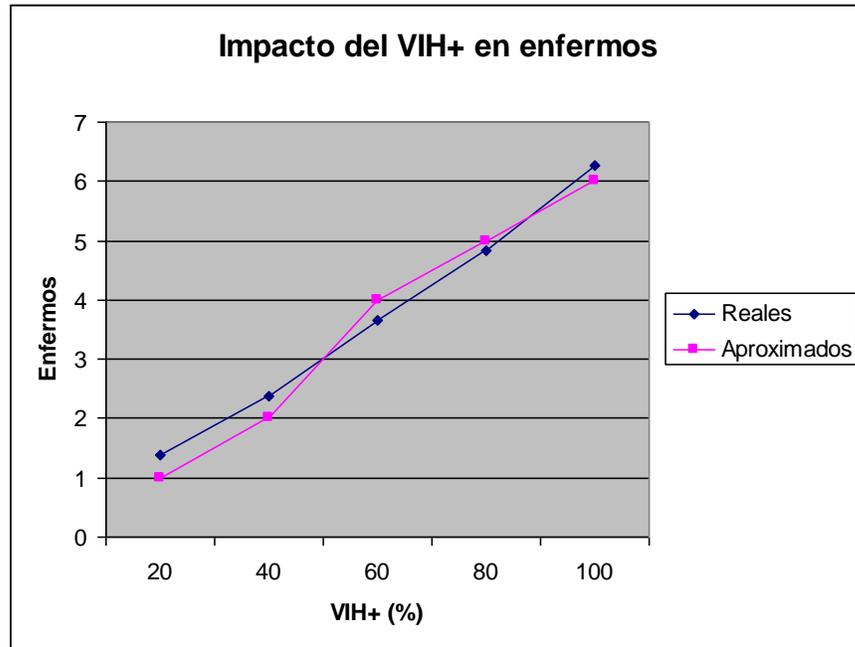
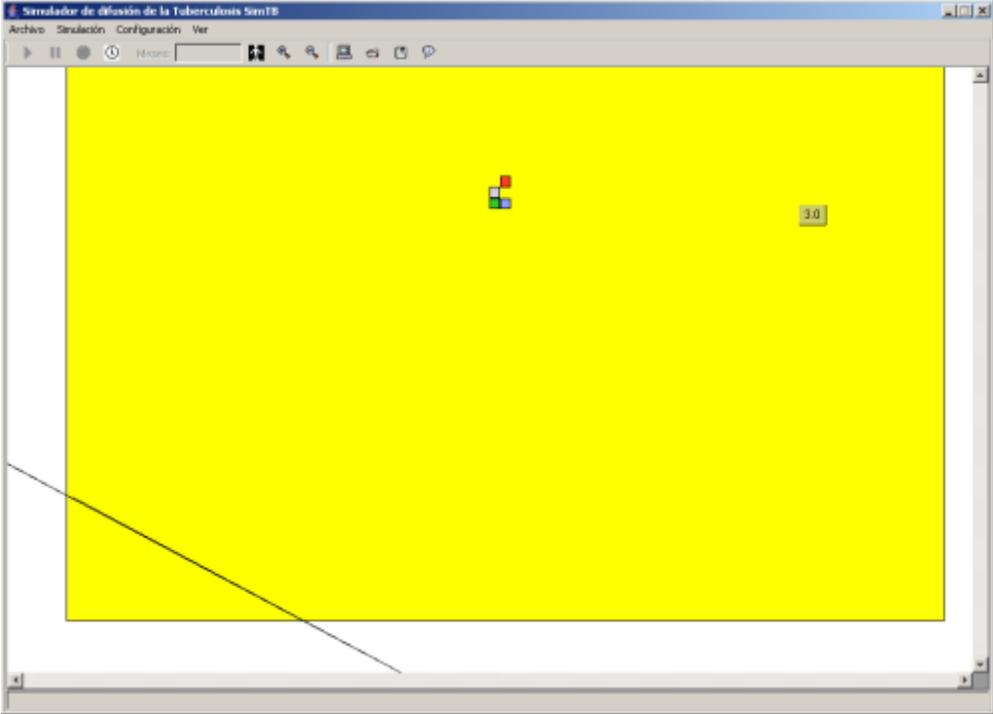
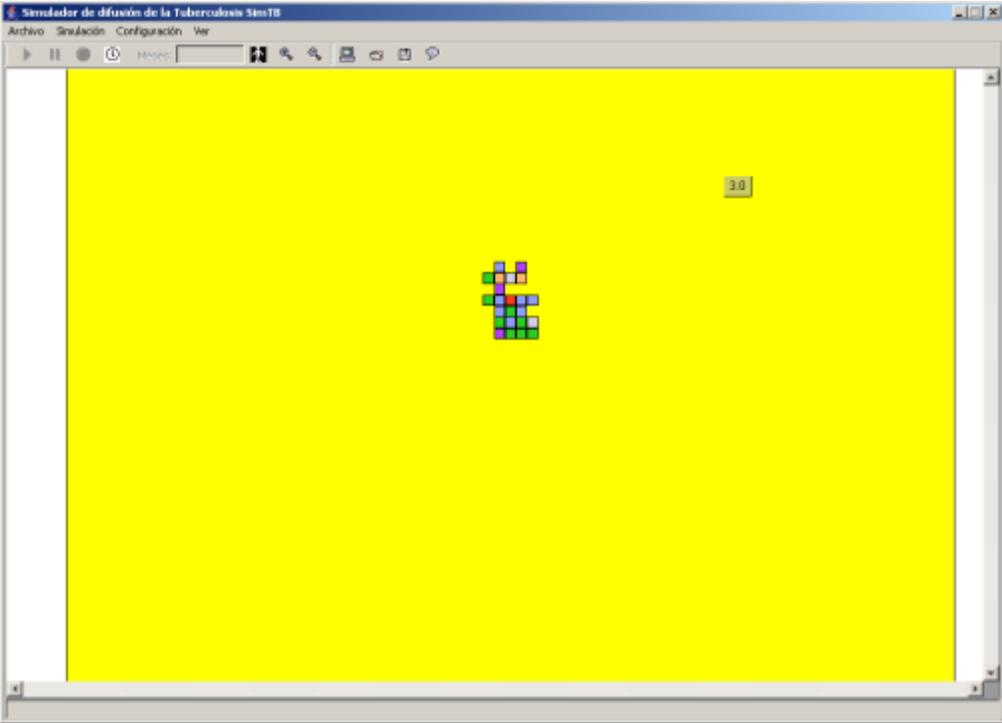


Fig. 6. 1 Impacto del VIH+ en enfermos

Visualización simulación VIH+ (%) = 20



Visualización simulación VIH+ (%) = 100



CASO 2: DESNUTRICIÓN

Enfermos iniciales=1

Tiempo de simulación=12 meses

Dimensión espacio o grilla = $(12 * 2) + 1 = 25$

Porcentaje de grilla=50%

Población = $25^2 * 50\% = 312.5 = 312$ habitantes

Área de zona crítica = 40000 m²

Cantidad de enfermos que definen una zona crítica = 3

n=30

Probabilidades:

- Sano - Infectado
Contacto=1
- Infectado - Enfermo
Grupos de edad y género sin valores
Factores de riesgo según teoría (probabilidad desnutrición=0.2)

Porcentajes factor de riesgo desnutrición= 20, 40, 60, 80, 100 %.

Con los resultados obtenidos de la simulación se realizó la siguiente grafica:

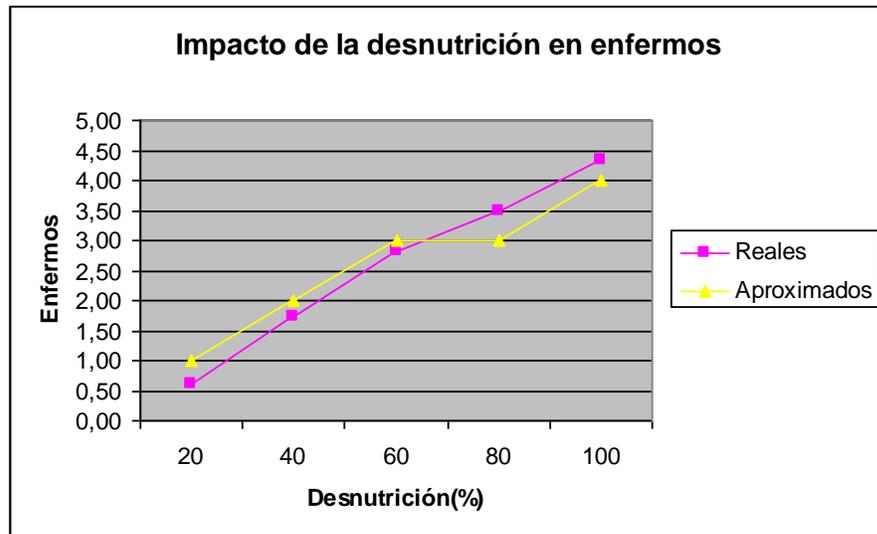
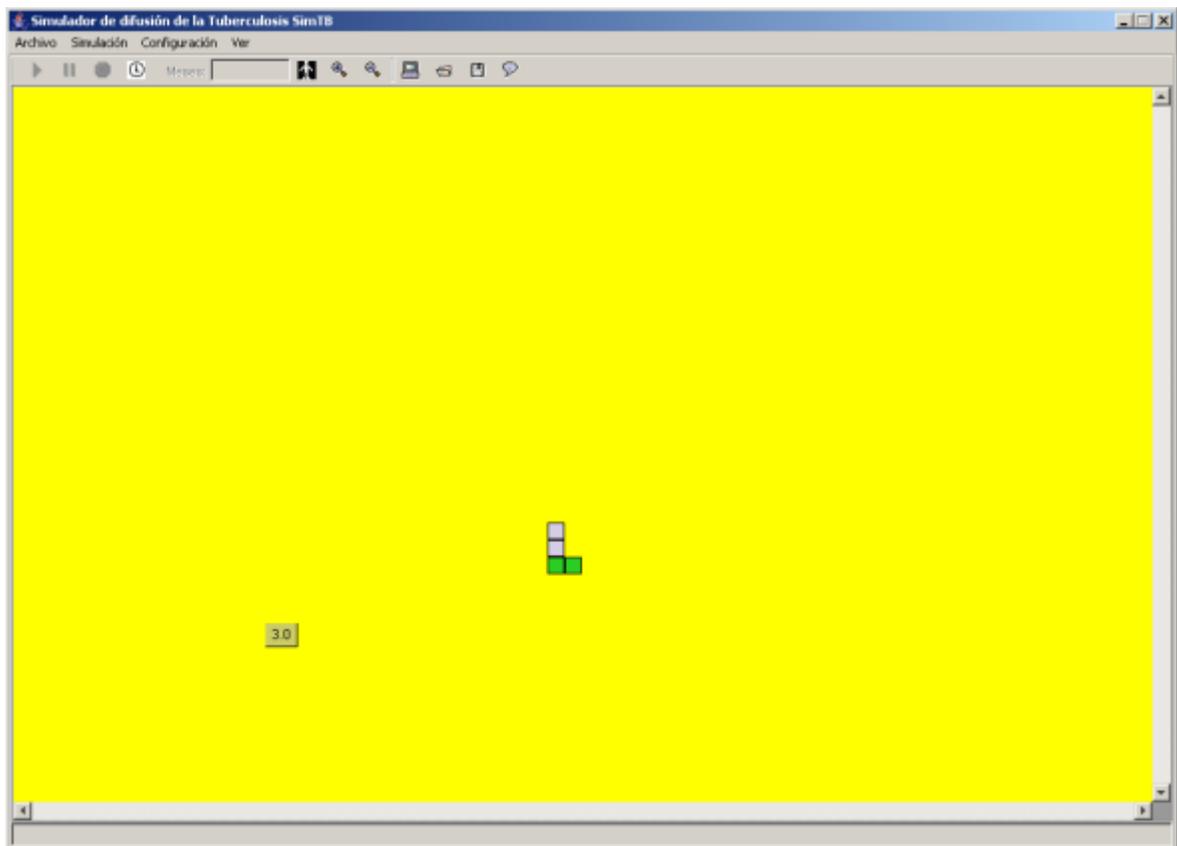
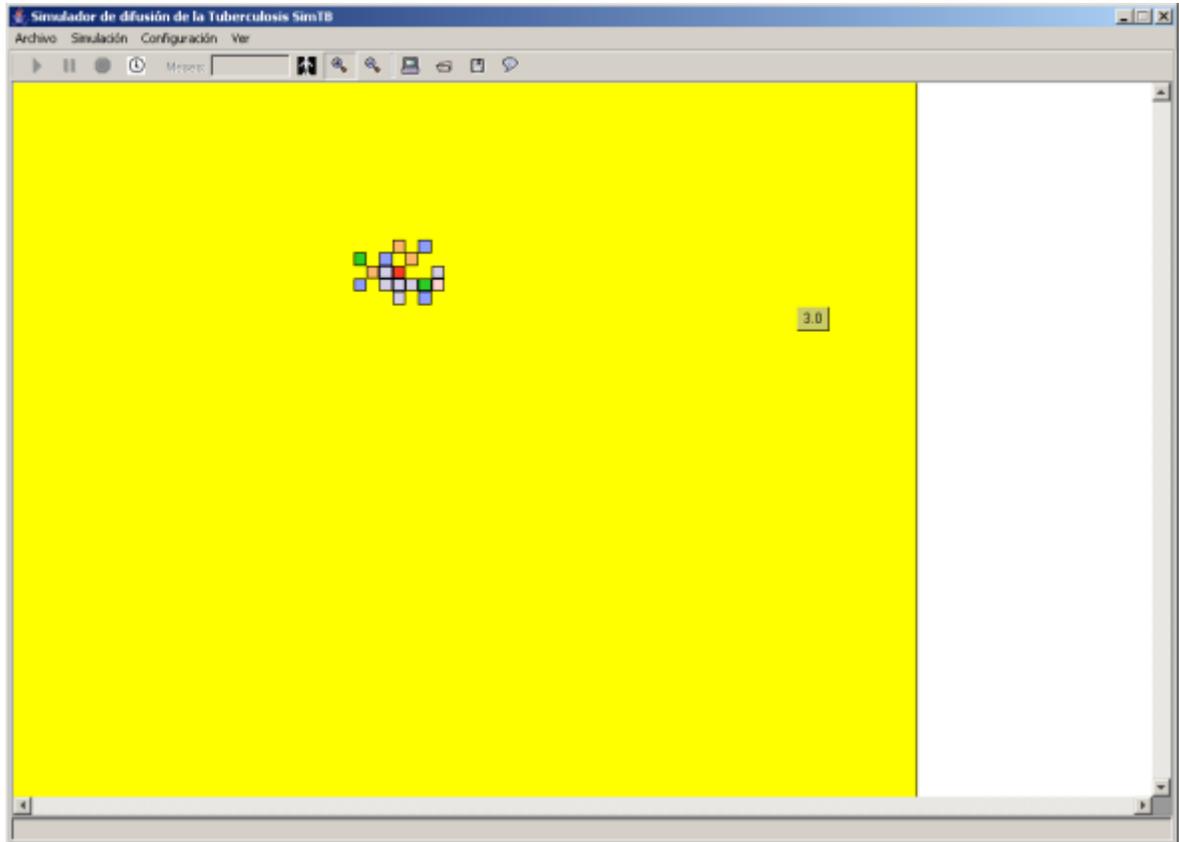


Fig. 6. 2 Impacto de la desnutrición en enfermos

Visualización simulación desnutrición (%) = 20



Visualización simulación desnutrición (%) = 100



En la siguiente grafica se comparan los resultados de los dos casos anteriores.

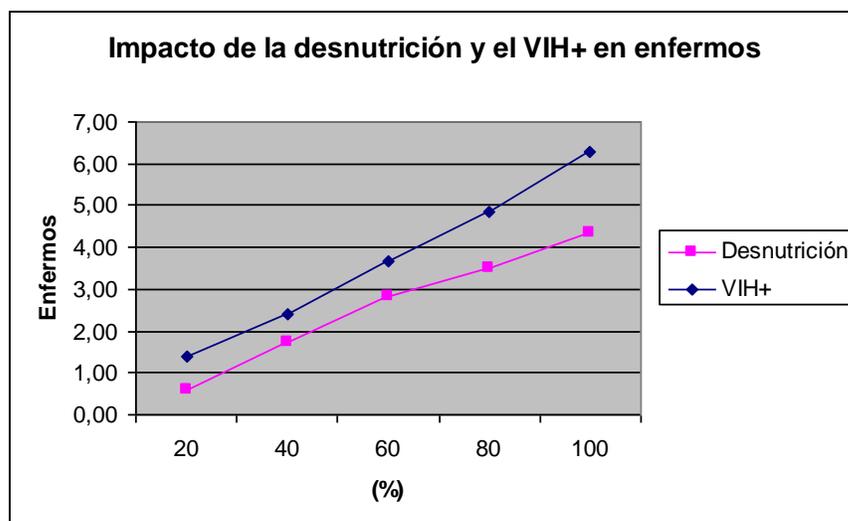


Fig. 6. 3 Impacto de la desnutrición y el VIH+ en enfermos

Análisis de resultados

En los dos casos se aprecia un fenómeno creciente de enfermos según se incrementa el factor de riesgo, ya sea VIH+ o desnutrición. Los nuevos enfermos aparecen a partir de las infecciones que produce el enfermo inicial. En estos dos casos, el cambio de un habitante Infectado a Enfermo depende de la probabilidad del factor de riesgo (VIH+ o desnutrición), solo si el habitante presenta dicho factor de riesgo.

Al comparar los resultados obtenidos en el experimento 1 para los factores de riesgo: sida y desnutrición, factores predisponentes en la aparición de enfermos de TB, se aprecia que el impacto del sida es mayor al impacto de la desnutrición. Este resultado responde a las probabilidades configuradas para el cambio de estado infectado a enfermo ya que en el caso 1 la probabilidad por sida es 0.5 y en el caso 2 por desnutrición es 0.2. Bajo un mismo porcentaje de población afectada por los factores de riesgo, el factor de riesgo con probabilidad más alta produce más enfermos, como se aprecia en la Fig.6.2. Como se ha mencionado anteriormente las probabilidades reciben su valor de acuerdo a los conceptos de la tuberculosis.

Conociendo el número de habitantes totales: 312, se podría pensar que aun con la población totalmente afectada por el VIH+, 100% en Fig.6.1 y Fig.6.2., son pocos los

enfermos resultantes; con el porcentaje de la grilla (pg) igual a 100 el habitante enfermo estaría rodeado por 8 habitantes vecinos sanos, en los casos el porcentaje de la grilla es igual a 50, entonces el enfermo inicial solo tiene 4 habitantes vecinos sanos. Lo anterior se calcula por medio de la ecuación de habitantes alrededor del enfermo, mencionada en el capítulo 2.

$$ch1^{er} \text{ contorno} = 8 \times \frac{Pg}{100}$$

En una simulación configurada con la probabilidad de contacto más alta (probabilidad 1), el enfermo inicial infecta a todos sus vecinos, en este caso 4 habitantes y si los nuevos infectados llegan a ser enfermos también infectarán solo a sus vecinos, de esta manera no se asegura que la mayoría de habitantes puedan infectarse y por lo tanto enfermarse.

EXPERIMENTO 2

Objetivo

Observar el número resultante de enfermos de TB a partir de ciertos enfermos iniciales, en un tiempo determinado. Considerando en el cambio de estado de sano a infectado la probabilidad por contacto. Y en el cambio de infectado a enfermo solo las probabilidades de grupos de edad y género.

Configuraciones

Configuración cambios de estado

Se deben configurar los intervalos de tiempo durante los cuales se evaluarán los cambios de estado.

Se configuran los cambios de estado sano a infectado e infectado a enfermo.

En sano a infectado solo debe configurarse la probabilidad por contacto.

En infectado a enfermo solo se configuran las probabilidades de grupos de edad y género, las otras probabilidades se dejan en cero.

El intervalo de tiempo de sano a infectado es de 1 a 3 meses y de infectado a enfermo de 2 a 8 meses

Configuración contagiosos

Todos los grupos de edad son habilitados como contagiosos.

Configuración población de zona

Los porcentajes de los grupos de edad y de género son configurados como en el experimento 1, estos porcentajes se mantienen para todas las zonas.

Ejecución

Se ubica un número de enfermos iniciales específico en determinadas zonas.

Se establece el tiempo de simulación.

Se realizan n simulaciones con los valores anteriores, para obtener la prevalencia promedio por grupos de edad en el tiempo de simulación.

CASO 1

Enfermos iniciales=1

Tiempo de simulación=12 meses

Dimensión espacio o grilla = $(12 * 2) + 1 = 25$

Porcentaje de grilla=50%

Población = $25^2 * 50\% = 312.5 = 312$ habitantes

Área de zona crítica = 40000 m²

Cantidad de enfermos que definen una zona crítica = 3

n=30

Probabilidades:

- Sano - Infectado
Contacto =100
- Infectado - Enfermo, valores de la configuración por defecto.

0 a 6 meses = 0.1
 7 meses a 2 años = 0.07
 3 a 10 años = 0.03
 11 a 18 años = 0.04
 19 a 40 años = 0.06
 41 a 60 años = 0.07
 61 años en adelante = 0.09
 Factores de riesgo según teoría.

Con los resultados obtenidos de la simulación se realizó la siguiente grafica:

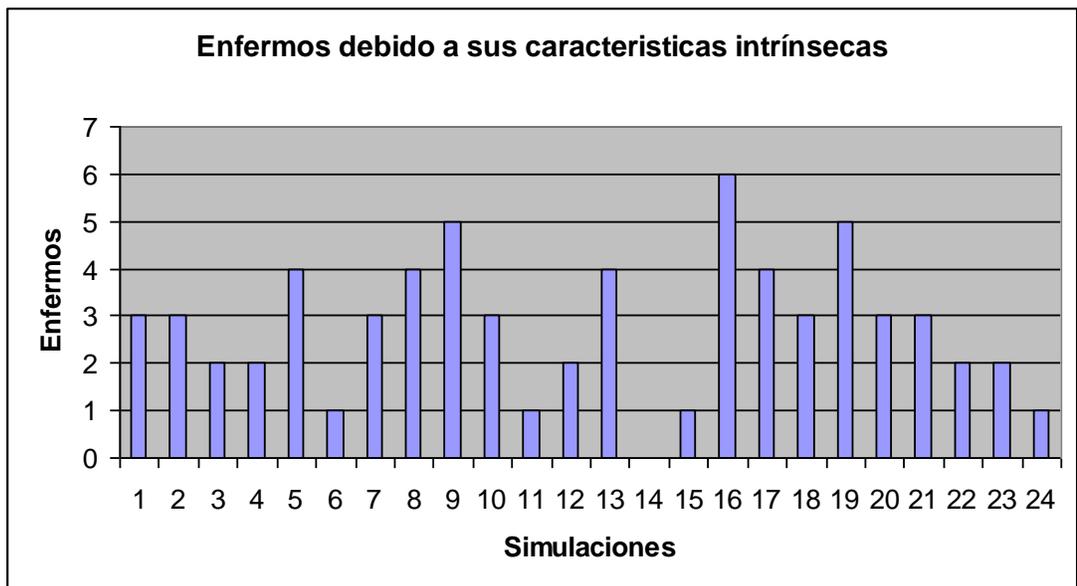


Fig. 6. 4 Enfermos debido s sus características intrínsecas (edad y género)

Análisis de resultados

El resultado arrojado por el simulador en esta prueba es bastante variado y no se encuentra un patrón de comportamiento definido, esto se debe a los procesos aleatorios de asignación de género y grupo de edad para los habitantes del espacio del enfermo inicial. En algunas simulaciones los habitantes vecinos del enfermo pueden ser del grupo de edad y/o genero más susceptible a la enfermedad, causando, el mayor número de

enfermos, como son los casos de las simulaciones 16, 9, 19 en la Fig. 6. 3. O por el contrario los habitantes alrededor del enfermo pertenecen a los grupos de edad y/o género menos susceptibles evitando que estos se enfermen, simulaciones 14, 6, 11, 15, 24.

EXPERIMENTO 3

Objetivo

Observar el impacto que producen las variaciones del nivel de un factor de riesgo en la población, en el número de enfermos de tuberculosis resultantes durante una simulación, para un tiempo específico. Considerando como única causa para la infección de habitantes sanos, el contacto con un habitante enfermo y como causas para el cambio de infectado a enfermo a un factor de riesgo y a las probabilidades por grupos de edad y género. Este experimento combina los dos anteriores.

Configuraciones

Configuración cambios de estado

Se configuran los cambios de estado sano a infectado e infectado a enfermo.

Se deben configurar los intervalos de tiempo durante los cuales se evaluarán los cambios de estado.

En sano a infectado solo debe configurarse la probabilidad por contacto.

En infectado a enfermo la configuración se realiza de acuerdo a la teoría de la enfermedad y la experiencia de los especialistas.

El intervalo de tiempo de sano a infectado es de 1 a 3 meses y de infectado a enfermo de 2 a 8 meses

Configuración contagiosos

Todos los grupos de edad son habilitados como contagiosos.

Configuración población de zonas

Los porcentajes de los grupos de edad y de género son configurados según los datos de población de la ciudad por grupos de edades y género del año escogido, estos datos

pueden ser conseguidos con la información de los censos realizados y/o con proyecciones de los datos de los censos, para el año deseado. Los casos presentados para este experimento fueron realizados con los datos censales de la ciudad de Popayán.

En los porcentajes de factores de riesgo asociados a la enfermedad de la tuberculosis todos los porcentajes a excepción del porcentaje del factor de riesgo de análisis reciben el valor de cero o se dejan en blanco. El factor de riesgo de análisis recibe un valor inicial.

Ejecución

Se ubica un número de enfermos iniciales determinado en una zona.

Se establece el tiempo de simulación.

Se realizan 10 simulaciones con el valor inicial para el factor de riesgo de análisis, para obtener el número promedio de enfermos resultantes debidos a ese valor.

Se escoge otro valor para el factor de riesgo; las configuraciones, el tiempo establecido y el número de enfermos que inician la simulación permanecen iguales y se realiza de nuevo el experimento. El experimento se realiza según el número de valores que se deseen analizar para el factor de riesgo.

CASO 1

Enfermos iniciales=1

Tiempo de simulación=12 meses

Dimensión espacio o grilla = $(12 * 2) + 1 = 25$

Porcentaje de grilla=50%

Población = $25^2 * 50\% = 312.5 = 312$ habitantes

Área de zona crítica = 40000 m²

Cantidad de enfermos que definen una zona crítica = 3

n=30

Probabilidades:

- Sano - Infectado

Contacto=100

- Infectado - Enfermo, valores de la configuración por defecto.

0 a 6 meses = 0.1

7 meses a 2 años = 0.7

3 a 10 años = 0.3

11 a 18 años = 0.4

19 a 40 años = 0.6

41 a 60 años = 0.7

61 años en adelante = 0.9

Factores de riesgo según teoría (probabilidad sida=0.5)

Porcentajes factor de riesgo sida=20, 40, 60, 80, 100 %.

Con los resultados obtenidos de la simulación se realizó la siguiente grafica:

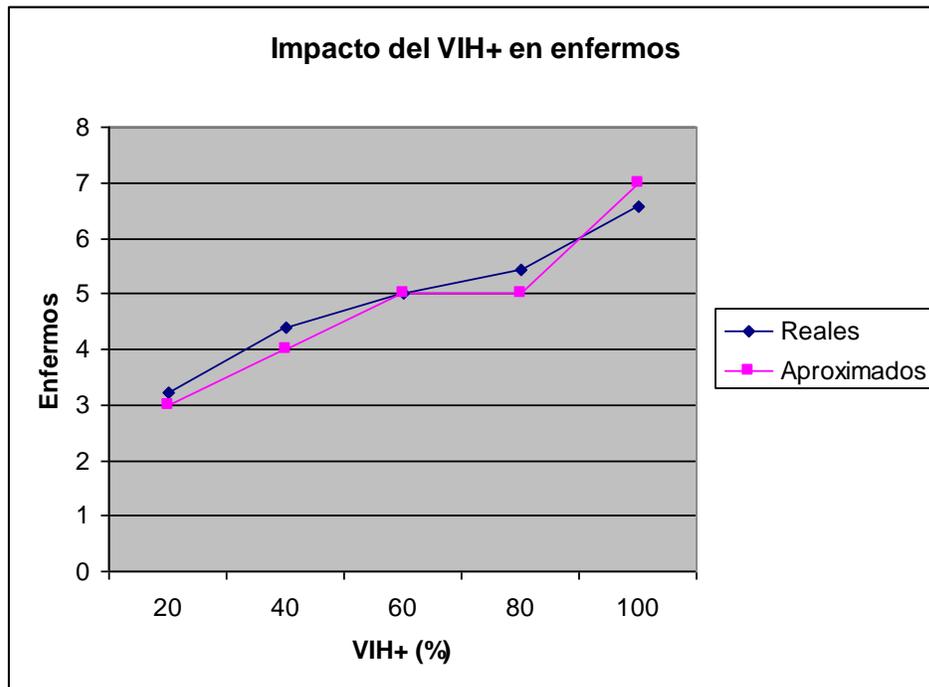


Fig 6. 5 Impacto del VIH+ en enfermos

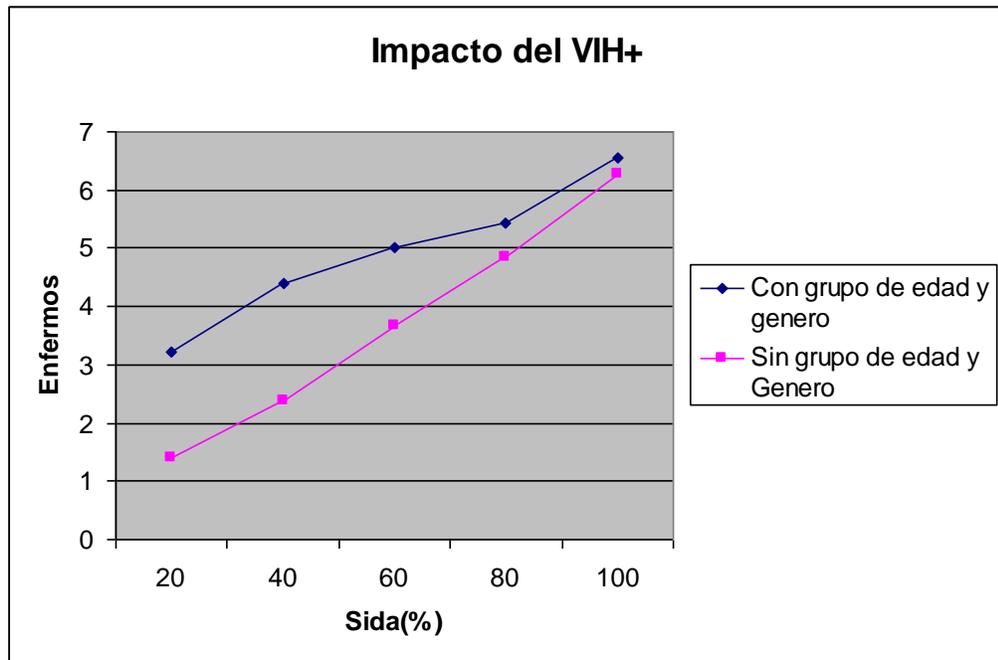


Fig 6. 6 Impacto del VIH+ con y sin probabilidades de grupo de edad y genero

Análisis de resultados

Los resultados alcanzados por esta prueba, al igual que el experimento 1, permiten observar incrementos en la cantidad de enfermos de acuerdo a la cantidad creciente de habitantes con el factor de riesgo a tratar: Sida o VIH+, es decir de acuerdo a incrementos del porcentaje del factor de riesgo en la población.

Tomando como referencia el resultado del experimento 1 y comparándolo con el resultado arrojado por el experimento 3 (Fig 6.6) se observa que con porcentajes bajos o medios de VIH+ en la población, parte de los enfermos resultantes de una simulación son causados por las probabilidades intrínsecas de los mismos habitantes: grupo de edad y género y otra parte de los enfermos se deben a la probabilidad de VIH+ de los habitantes. Esto ocurre ya que todos los habitantes tienen asignadas las características de grupo de edad y género pero solo algunos de los habitantes tienen el factor de riesgo VIH+, por lo tanto la probabilidad de VIH+ estaría actuando solo en esos habitantes. Lo anterior se visualiza en la Fig.6.6 para los porcentajes 20, 40 y 60.

Con porcentajes altos de VIH+ en la población, la aparición de nuevos enfermos, en su gran mayoría, se deberá a la probabilidad de VIH+ de los habitantes afectados por este factor riesgo, ya que la probabilidad de VIH+, que evalúa cada habitante para el cambio de estado infectado a enfermo, es mayor que cualquier otra probabilidad para este cambio de estado. Así la probabilidad de VIH+ es mucho mayor a las probabilidades de edad y género, por lo tanto con porcentajes altos de VIH+ en la población, los habitantes evaluarán sus probabilidades intrínsecas y además la probabilidad de VIH+, pero por ser esta última la de valor más alto (0.5) es más factible que esta produzca el cambio de estado y de esta manera las probabilidades intrínsecas no contribuyen con la aparición de más enfermos. Esta tendencia se puede ver en la Fig 6. 6 a partir del porcentaje de 80.

EXPERIMENTO 4

Objetivo

Observar el número de enfermos de TB por zonas (estratos) en la ciudad, en un tiempo determinado.

Configuraciones

Configuración cambios de estado

Se deben configurar los intervalos de tiempo durante los cuales se evaluarán los cambios de estado.

De **sano a infectado** se configura la probabilidad de contacto y además se configuran las probabilidades de **contacto y hacinamiento** y **contacto y otros factores de transmisión**.

De **infectado a enfermo** se configuran las probabilidades que tienen una relación con la estratificación como son **Desnutrición y Malas condiciones sanitarias**.

El intervalo de tiempo de sano a infectado es de 1 a 3 meses y de infectado a enfermo de 2 a 8 meses

Configuración contagiosos

Todos los grupos de edad son habilitados como contagiosos.

Configuración población de zona

La configuración de grupos de edad y género se realiza como en el experimento 3.

Para los porcentajes de los factores de riesgo solo se configuran los que tienen una relación con la estratificación como son: **Hacinamiento, Otros factores de transmisión, Desnutrición, Malas condiciones sanitarias**. Los valores de estos factores dependen de cada zona.

Ejecución

Se ubica un número de enfermos iniciales en cada zona, igual número de enfermos por zona.

Se establece el tiempo de simulación.

Se realizan n simulaciones con los valores anteriores, para obtener el número de enfermos promedio por zonas en el tiempo de simulación.

CASO 1

Enfermos iniciales en cada zona = 1

Tiempo de simulación=12 meses

Dimensión espacio o grilla = $(12 * 2) + 1 = 25$

Porcentaje de grilla=50%

Población = $25^2 * 50\% = 312.5 = 312$ habitantes

Área de zona crítica = 40000 m²

Cantidad de enfermos que definen una zona crítica = 3

n=30

Probabilidades:

- Sano - Infectado
Contacto=0.15
Contacto y hacinamiento=1
Contacto y otros factores de transmisión=1
- Infectado - Enfermo

Desnutrición=0.2

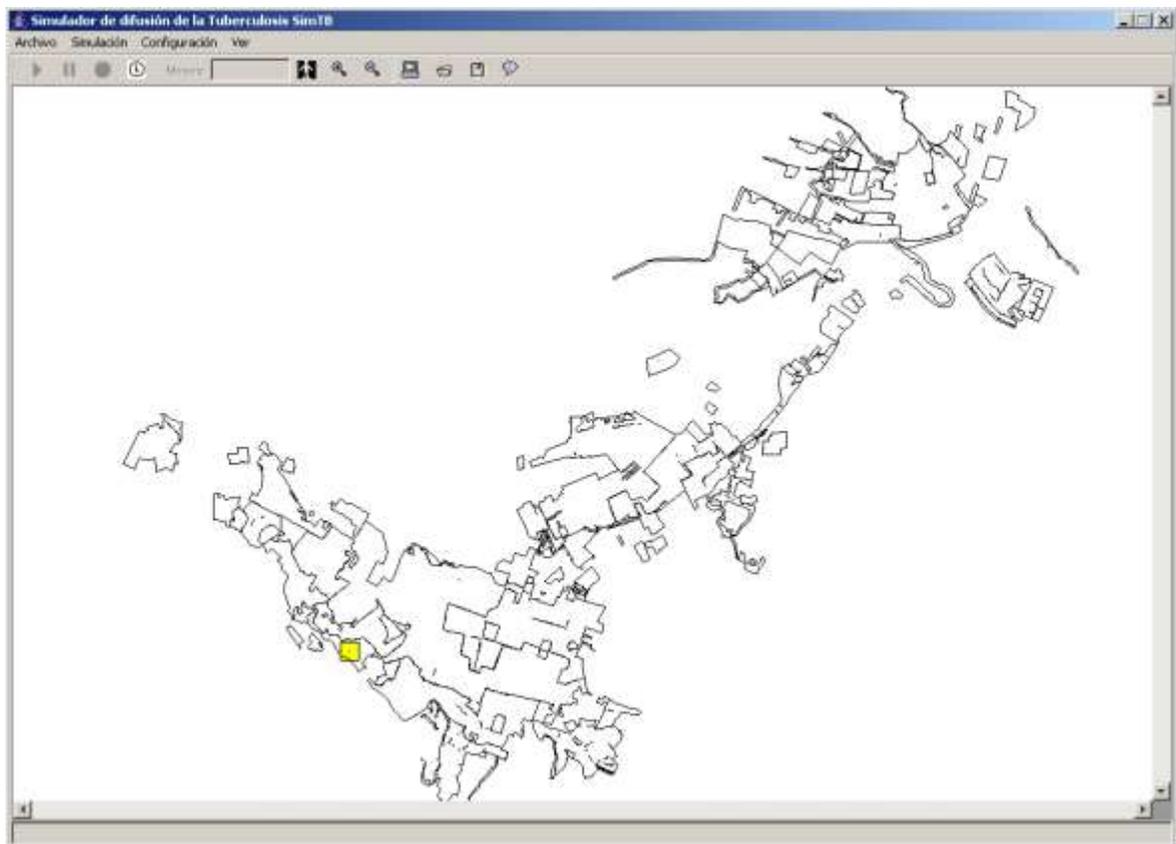
Malas condiciones sanitarias=0.1

Factores de riesgo (%):

- Zona 1
 - Otros factores de transmisión = 20
 - Hacinamiento = 20
 - Desnutrición = 15
 - Malas condiciones sanitarias = 20
- Zona 2
 - Otros factores de transmisión = 10
 - Hacinamiento = 10
 - Desnutrición = 5
 - Malas condiciones sanitarias = 10
- Zona 3
 - Otros factores de transmisión = 1
 - Hacinamiento = 3
 - Desnutrición = 1
 - Malas condiciones sanitarias = 0
- Zona 4, 5, 6
 - Otros factores de transmisión = 0
 - Hacinamiento = 0
 - Desnutrición = 0
 - Malas condiciones sanitarias = 0

Visualización estrato 1 y 6 en una simulación

Solo se presenta una zona crítica en el estrato 1.



Con los resultados obtenidos de las simulaciones se realizó la siguiente grafica:

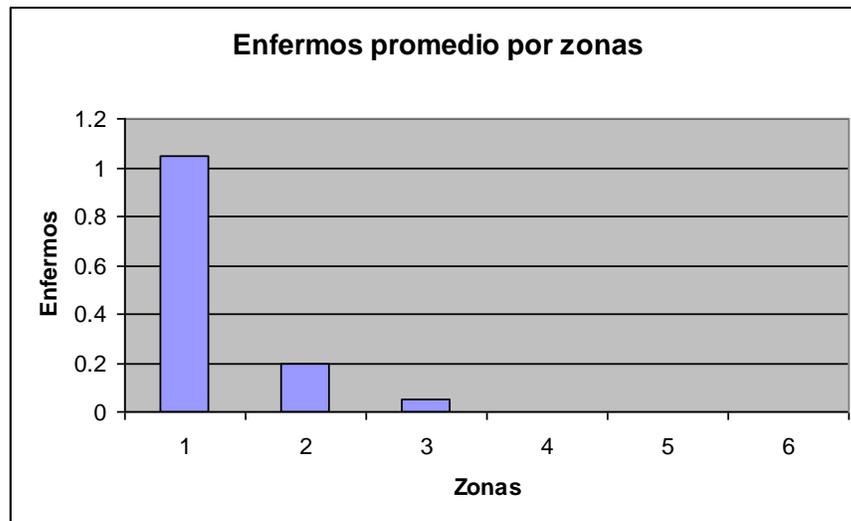


Fig 6. 7 Enfermos promedio por estrato.

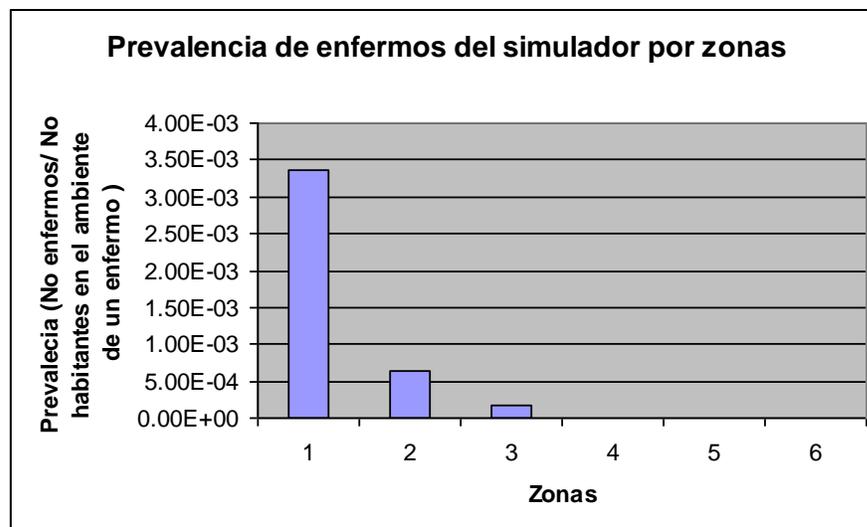


Fig 6. 8 Prevalencia de enfermos del simulador por zonas.

Análisis de resultados

En la Fig.6.7 se observa un comportamiento decreciente para el número de enfermos a medida que el estrato aumenta. Esto se debe a que el estrato 1 es el más afectado por los factores de riesgo de **Hacinamiento**, **Otros factores de transmisión**, **Desnutrición** y **Malas condiciones sanitarias**, pero a medida que el estrato aumenta el porcentaje de estos factores en la población disminuye, la configuración de estos factores en cada zona, en el

caso 1 pretende plasmar la realidad de los estratos en las zonas del simulador. El estrato 1 y 2 presentan todos los factores mencionados anteriormente, el estrato 3 presenta valores bajos para desnutrición, hacinamiento y otros factores de transmisión y en los estratos 4, 5, 6 no se consideran dichos factores porque su incidencia es prácticamente nula.

Para obtener la prevalencia de enfermos por zonas (No enfermos/ No habitantes por zona) Fig 6.8, se tomo la misma población total para las seis zonas, porque el simulador para cada enfermo inicial, ubicado en cualquier zona, crea un espacio con el mismo numero de habitantes, como ya se había explicado este valor es de 312 habitantes en los casos. La gráfica de prevalencia de enfermos por zonas, Fig.6.8, tiene el mismo comportamiento que la gráfica de enfermos por zonas, Fig.6.7, debido a que se utiliza la misma población total para las seis zonas.

A continuación se presentan las gráficas de enfermos y prevalencia de enfermos por estratos, según los datos de los pacientes de TB de Popayán, registrados en la Dirección departamental de salud del Cauca, para el año 2000.

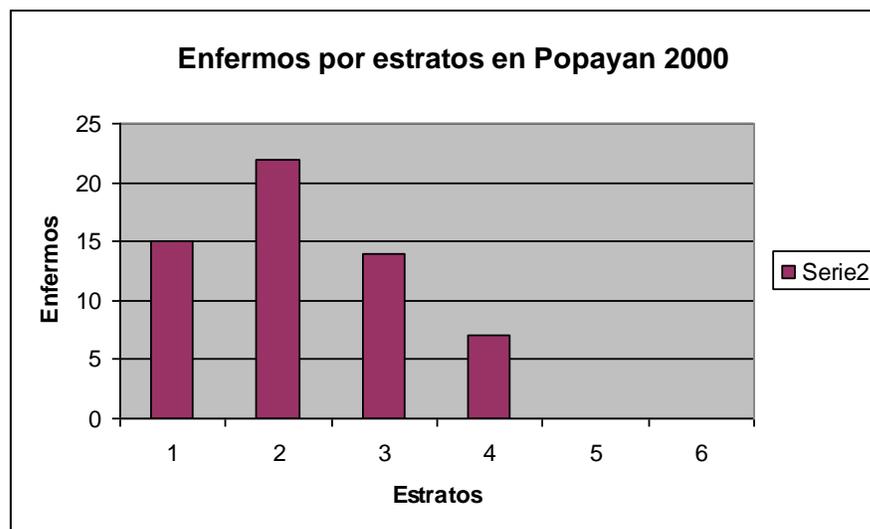


Fig 6. 9 Enfermos por estratos en Popayán 2000.

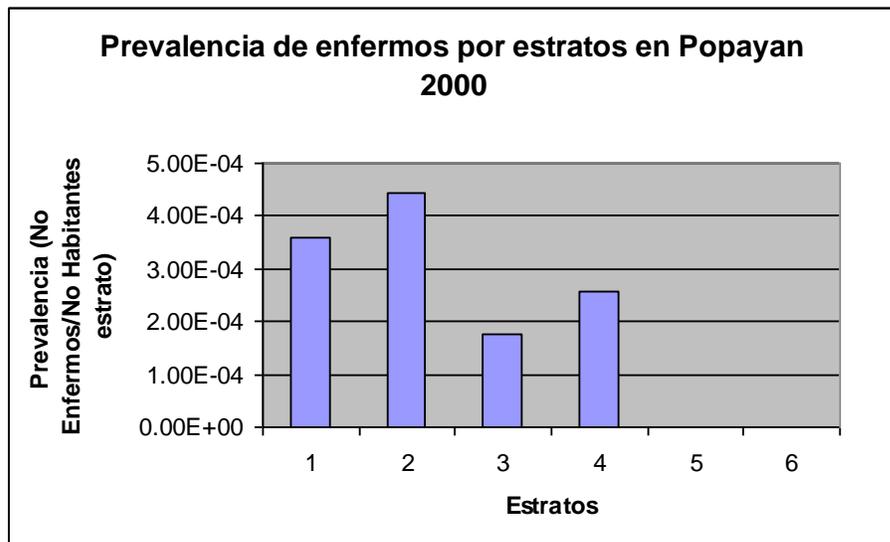


Fig 6. 10 Prevalencia de enfermos del simulador por zonas.

Las Fig. 6.9 y Fig 6.10 presentan comportamientos diferentes debido a que cada estrato de la ciudad de Popayán tiene un número de habitantes diferente.

Al comparar la prevalencia de enfermos por estratos obtenida a partir de los resultados del simulador (Fig.6.8) con la prevalencia de enfermos por estratos según los datos reales (Fig.6.10) se observa que la tendencia no es la misma. Según la Fig. 6.8 el estrato 1 es el mas afectado, pero esto no ocurre en la Fig 6.10, esto se debe posiblemente a la falta de búsquedas activas que permitan registrar a la mayor cantidad de población enferma de tuberculosis pues este estrato presenta una baja tasa de consultas medicas debido a los pocos recursos económicos de la población de este estrato y a factores culturales. La Fig. 6.10 muestra para el estrato 4 una prevalencia de enfermos considerable, mientras que en el simulador no existe esta prevalencia, esto se debe a que en el experimento con el simulador solo se consideraron los factores de riesgo de Hacinamiento, Otros factores de transmisión, Desnutrición y Malas condiciones sanitarias, factores que no afectan notoriamente ala población del estrato 4, en el caso del experimento en realidad no la afectan porque el valor asignado a los porcentajes es cero, pero los factores de riesgo predisponentes para la TB no son solo los que se relacionan visiblemente con la estratificación, algunos de los otros factores, mencionados en capítulos anteriores, como sida o VIH+, consumo de sustancias sicoactivas, estrés, diabetes posiblemente son los

causantes de la prevalencia que presenta el estrato 4 en la Fig.6.10. Además los riesgos o probabilidades intrínsecas también podrían estar aumentando el número de enfermos en este estrato, si es que este presenta un número considerable de habitantes que pertenecen a los grupos de edad más susceptibles para el desarrollo de la tuberculosis.

6 CONCLUSIONES

- La difusión de la tuberculosis es un fenómeno complejo que involucra numerosas variables de los habitantes y del ambiente. Los modelos matemáticos realizados acerca de la dinámica de la enfermedad solo han incluido ciertas variables debido a la complejidad de realizarlos teniendo en cuenta a la mayoría de estas variables. Los modelos basados en autómatas celulares no describen un fenómeno o sistema complejo con ecuaciones complejas, estos permiten que la complejidad emerja por la interacción de individuos simples uniformes que siguen reglas simples de vecindad, pero de acuerdo al fenómeno complejo de la difusión de la tuberculosis no es adecuado modelar a un habitante como una célula ya que los habitantes de una población son heterogéneos y sus reglas de comportamiento no solo dependen de su vecindad. El modelamiento basado en agentes o individuos es una herramienta potente que permite abordar la complejidad de un fenómeno o sistema, el modelo basado en individuos de difusión de la tuberculosis permite observar el comportamiento emergente de la difusión de la TB en una población heterogénea debido al comportamiento e interacciones de los habitantes.
- La visualización geográfica de la simulación permite al usuario observar los resultados de la simulación en un contexto conocido por el, con el cual identifica aproximadamente la ubicación geográfica de las zonas de mayor prevalencia de enfermos.
- Los experimentos con el Simulador de difusión de la tuberculosis que utilizan configuraciones de cambios de estado y zonas, acordes con los conceptos teóricos y experiencias de los especialistas en tuberculosis, arrojan resultados correspondientes a los conceptos que se manejan de la tuberculosis.
- El simulador de difusión de la tuberculosis es un sistema que permite experimentación de hipótesis por medio de la configuración de variables de zona y de

cambios de estado de los habitantes de dicha zona para obtener resultados según estas configuraciones.

- Para alcanzar resultados que puedan ser cercanos con la realidad es necesario alimentar las configuraciones de los cambios de estado de acuerdo a la teoría y la experiencia de los especialistas en tuberculosis y las configuraciones de zonas con datos verídicos y actualizados que permitan crear ambientes de simulación similares a los ambientes reales.
- En la realización de modelos basados en individuos para simulaciones es necesario modelar adecuadamente a cada individuo, es esencial entender y asimilar el comportamiento interno de un individuo o agente y sus interacciones con otros agentes, en el dominio del problema, ya que el conjunto de comportamientos e interacciones permitirán observar el fenómeno global de interés.
- El proceso de desarrollo de una herramienta debe estar soportado por asesores temáticos del dominio del problema, al no contar con un soporte adecuado, el tiempo para el desarrollo del proyecto definido en la planeación puede crecer considerablemente.
- Para la concepción de modelos que intentan describir el comportamiento de individuos en cualquier contexto y donde no se han diseñado estudios estadísticos con el objetivo de abstraer estos comportamientos, es adecuado para estos casos fundamentar los modelos en marcos teóricos de dichos comportamientos y en la experiencia de especialistas en el tema.

7 RECOMENDACIONES

- Utilizar en el simulador de difusión de la tuberculosis mapas geográficos que incluyan puntos estratégicos de la ciudad o región geográfica de estudio, permitiendo asociar la localización de las zonas de mayor prevalencia de tuberculosis con dichos puntos estratégicos.
- En los proyectos interdisciplinarios se requiere, desde un principio, crear un plan de trabajo que se cumpla estrictamente y sobre todo, que tanto especialistas como desarrolladores, busquen espacios para compartir experiencias y avances que enriquezcan los productos del proyecto.
- Aprovechar el espacio que un proyecto de grado abre a la imaginación, para expresar y sentirse capaces de plasmar en palabras el esfuerzo demandado y la satisfacción de los logros obtenidos, mas que un requisito para un título es la oportunidad de ser responsables, disciplinados y creativos, cualidades que hacen al humano un mejor ser.

Trabajos futuros

- Desarrollar una aplicación que permita gestionar, es decir modificar, eliminar, adicionar, zonas, estados clínicos, probabilidades para un cambio de estado, grupos de edad y factores de riesgo de una zona y grupos de edad contagiosos.
- Visualizar en el mapa geográfico todos los habitantes con su estado clínico respectivo. Los datos de todos los habitantes están almacenados al final de una simulación en una lista de habitantes, el trabajo consistiría en clasificarlos según el estado clínico y visualizarlos con ayuda de geoTools.

- Incluir en el modelo basado en individuos de difusión de la tuberculosis el efecto de contactos casuales de habitantes sanos con habitantes enfermos, este tipo de contactos tienen mucha relevancia en ciudades grandes con medios masivos de transporte.
- Incluir la dinámica de transmisión de TB resistente a drogas en el modelo. Nuestro modelo considera la resistencia a drogas adquirida, es decir, la que se produce cuando se presentan fallas en el tratamiento de TB sensitiva a drogas, pero no considera la transmisión de TB resistente a drogas, solo se trata la transmisión de TB sensitiva a drogas.

REFERENCIAS

Referencias bibliográficas

- [1]. Joseph P. Bigus, Jennifer Bigus: Costructing intelligent agents using java, Segunda edición, 2001.
- [2]. Michael Wooldridge: An introduction to multiagent systems, 2002.
- [3]. Gerhard Weiss: Multiagent systems, a modern approach to distributed artificial intelligence, 2000.
- [4]. David Ríos Insua, Sixto Ríos Insua, Jacinto Martín: Simulación, métodos y aplicaciones.
- [5]. Sheldon M. Ross, Simulación, Segunda edición.
- [6]. Mario C. Raviglione, Richard J. O'Brien. Tuberculosis. En Harrison's Principles of Internal Medicine, 2001, 15Th Edition.
- [7]. Dye C et al: Global burden of tuberculosis: Estimated incidence, prevalence, and mortality by country. JAMA 282:677, 1999
- [8]. Juan P. Aparicio et al: Transmisión and Dynamics of Tuberculosis on Generalized Households, 2000
- [9]. Henrique Fabricio Gagliardi et al: EpiCASim: an autómata network simulator applied to the spread of epidemics, 2002.
- [10]. Sally M. Blower, Julie L. Gerberding: Understanding, predicting and controlling the emergence of drug-resistant tuberculosis: a theoretical framework, 1998.

[11]. Brian M. Murphy et al: Comparing epidemics tuberculosis in demographically distinct heterogenous populations, 2002.

[12]. SINCO-TB (Sistema Inteligente para el Control de la Tuberculosis). Propuesta para la participación en la convocatoria nacional para el concurso de Proyectos de Investigación. FIET. Universidad del Cauca. Popayán 2002

[13]. Guía de atención de tuberculosis pulmonar y extrapulmonar (Colombia).

[14]. Historia natural de la tuberculosis. Facultad de Medicina, Universidad del Cauca, Popayán.

[16]. Anuario Estadístico del Cauca 2002.

[17]. DANE: Datos censales Popayán 1993, 1985.

[18]. Carlos Enrique Serrano Castaño: Modelo para la Construcción de Soluciones Versión 1.0, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones Universidad del Cauca. Popayán, Colombia 2001.

[19]. Martin Bravo Obando, Jorge Fair Moreno Chaustre: Análisis y diseño orientado a objetos, 2002.

[20]. Julio Ariel Hurtado Alegría: El proceso unificado de desarrollo de software.

[21]. David Hiebeler: The Swarm simulation System and Individual-based Modeling, 1994.

Referencias web

[W1]. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs104/en/>

[W2]. <http://www.cdc.gov/spanish/enfermedades/tb/tbfaq.htm>

[W3]. www.ess.co.at/GAIA/CASES/ARG/javamod/modelos.htm

[W4]. <http://www.swarm.org>

[W5]. <http://www.geotools.org>

[W6]. <http://www.jdom.org>

Información adicional sobre documentación o la aplicación construida, solicitarla a angelaj@unicauca.edu.co, ameneses@unicauca.edu.co.