

Dinámica de Sistemas aplicada a la Epidemiología de Tuberculosis en una Localidad Periférica de Bogotá, Colombia

Pantoja L, Moreno L.

Universidad Central. Bogotá, Colombia

Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia

Resumen

La tuberculosis en Bogotá y principalmente en la localidad de Usme ha resurgido a pesar de que se consideraba una enfermedad controlada pero que la Organización Mundial de la Salud (OMS) reconoce prioritaria su atención debido al resurgimiento principalmente en los países en vía de desarrollo; es por ello que este documento pretende mostrar mediante el uso de la Dinámica de Sistemas cómo condiciones particulares de vida tales como pobreza, desplazamiento, desnutrición y desempleo son algunos factores que influyen en la propagación de esta enfermedad con el fin de definir su impacto y poder dar alternativas para el control de dicha enfermedad y con ello ayudar a las entidades de salud a tomar decisiones basadas en conocimientos validados técnicamente para el beneficio de la salud.

Palabras Clave

Tuberculosis, Usme, Dinámica de Sistemas, Epidemiología

Introducción

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud un total de 8,8 millones de personas en todo el mundo se enfermaron de tuberculosis en el 2010 y 1,4 millones fallecieron durante el mismo año; y aunque esta cifra ha ido descendiendo con respecto a años anteriores, la lucha contra la tuberculosis fármaco resistente MDR-TB (por su sigla en inglés) carece de recursos suficientes para su atención ya que la misma organización afirma que para su tratamiento hay un déficit de mil millones de dólares en el 2012. Es por ello que se hace un llamado desde el organismo para que exista “un apoyo serio y sostenido para la prevención y atención de la tuberculosis, especialmente para las personas más pobres y vulnerables del mundo” [1].

Debido a esto y teniendo en cuenta que existen diversos determinantes socio-económicos (tales como pobreza, educación, o acceso a servicios sanitarios) y la exposición a factores de riesgo (por ejemplo, tabaco, SIDA, diabetes) que tienen un gran impacto sobre la incidencia de la tuberculosis, resulta necesario determinar relaciones causales y áreas claves en las cuales deben focalizar los recursos quienes definen políticas sanitarias en la prevención de dicha enfermedad debido a que en este momento Colombia vive un resurgimiento de enfermedades que han reaparecido como por ejemplo el dengue, el paludismo, la fiebre amarilla y la tuberculosis, ésta última con muchísima fuerza [1].

Dado que la prevención y el control de la tuberculosis pueden encuadrarse dentro de los problemas de gestión sanitaria que requieren un tratamiento sistémico [2], el

objetivo de este documento es desarrollar un modelo conceptual basado en dinámica de sistemas de la tuberculosis y su relación con determinantes socio-económicos y factores de riesgo con el fin de que los organismos de salud puedan tomar decisiones que coadyuven con la prevención y tratamiento de dicha enfermedad.

Tuberculosis

La tuberculosis (TB) es una enfermedad infecciosa mortal causada por una bacteria llamada *Mycobacterium tuberculosis* que suele atacar con más frecuencia los pulmones, dado que se instala en los lugares con mucosidades, cuya propagación depende principalmente de cuatro factores: virulencia, resistencia, hipersensibilidad y génesis del patrón granulomatoso. Esta enfermedad presenta la sintomatología que contiene tos, expectoración algunas veces con flema y/o con sangre, sudoración excesiva vespertina, fiebre, fatiga y pérdida involuntaria de peso. También pueden presentarse dificultades respiratorias, y en oportunidades dolor de tórax [3].

La TB se presenta principalmente en países en desarrollo, donde el Estado no ha tenido un compromiso claro con el sistema de salud, el cual no se encuentra preparado para enfrentar los retos y las exigencias que demandan la reducción de los riesgos sanitarios y la promoción de una vida sana. En Latinoamérica se observan sistemas de salud fragmentados, con debilidades estructurales y funcionales, no articulados con otros actores gubernamentales y de la sociedad civil. A ello se le suma déficit presupuestal, con una disminuida capacidad de gasto por la complejidad de los procesos, además de problemas en gestión, infraestructura, equipamiento y recurso humano, entre otros; teniendo así el escenario epidemiológico y sanitario adecuado para el desarrollo de esta enfermedad [4].

Particularmente en Colombia, más del 45% de la población se ubica por debajo de la línea de pobreza, la población en miseria alcanza el 5.20% y la tasa de desempleo a diciembre de 2008 superaba el 14% , lo que muestra en general que en el país hay condiciones sociales que favorecen la transmisión y desarrollo de estas enfermedades [5], reforzado por el hecho de que Colombia no se poseen herramientas de carácter tecnológico basado en dinámicas de propagación de epidemias que permitan abordar, visualizar y contrarrestar con eficacia y eficiencia su propagación [6].

En la actualidad se puede decir que la tuberculosis en el desplazamiento forzado por el conflicto armado en Colombia encuentra uno de sus puntos de apoyo, además sus consecuencias como la pobreza, la falta de condiciones de higiene y el hacinamiento generan y reproducen deficientes condiciones de salubridad y la diseminación de enfermedades de transmisión sexual (como el VIH), que atacan principalmente el sistema inmunológico, complementadas con lugares de origen infectados, y bajos niveles de instrucción, pueden llevar a la muerte, ya que en gran parte la expansión tuberculosa, se apoya en la ausencia de anticuerpos en medio de una coinfección [7].

A pesar de los considerables esfuerzos que Colombia ha hecho para disminuir el contagio y propagación de las enfermedades contagiosas y pese a las políticas adoptadas para el control de dichas enfermedades, en el país se presentan considerables dificultades en su detección y tratamiento ya que muchas de estas enfermedades generalmente están tratadas con base a la sospecha clínica pues no pueden ser confirmadas oportunamente [8], por lo que es pertinente la inclusión de avances tecnológicos y el planteamiento de modelos de simulación que colaboren y contribuyan

en la prevención de enfermedades que permitan encontrar alternativas de diagnóstico más rápidas y eficientes.

Tuberculosis en Bogotá DC.

A Bogotá llegan mensualmente 1.575 familias desplazadas y en los municipios aledaños cerca de 669 familias; los cuales se ubican generalmente en las localidades al oriente de la ciudad como lo son Ciudad Bolívar, Usme, San Cristóbal, Candelaria Mártires en zonas alejadas las cuales no cuentan con las condiciones básicas de vivienda favoreciendo la presencia de la tuberculosis pulmonar [9]. Dado que la tasa de incidencia de Tuberculosis está definida como el número de casos diagnosticados con Tuberculosis Pulmonar por cada 100.000 habitantes, se puede afirmar que en Bogotá este indicador se ha incrementado desde el año 1998, pasando de 6,5 hasta 7,5 casos por cada 100.000 personas para el 2009 [9].

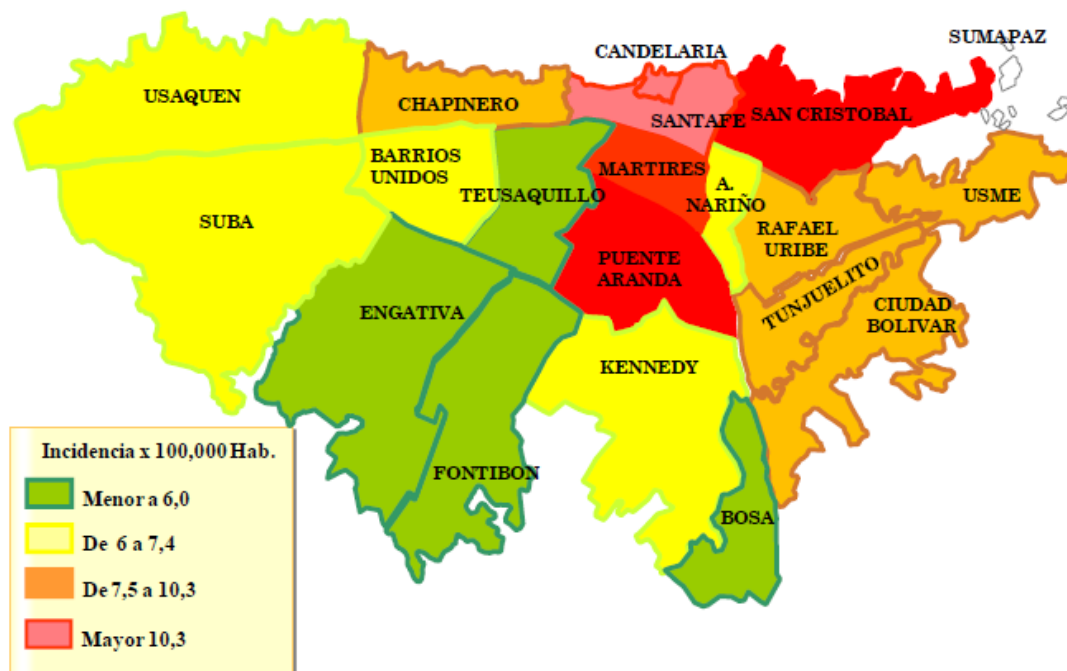


Figura 1. Tasa de incidencia de Tuberculosis Pulmonar en Bogotá por localidad de residencia Bogotá. Fuente: Boletín Epidemiológico Distrital de Tuberculosis Pulmonar, Secretaría Distrital de Salud, 2010.

Localidad de Usme, Bogotá DC.

Usme, localidad 5 de Bogotá, se ubica como una de las zonas en las cuales, se ha visto más aletargado el paso de la urbanización, dado que este sector históricamente, se ha reconocido como una población rural, la cual hasta su inclusión como localidad de Bogotá, desarrollaba sus actividades, su comercio y toda su vida social, en torno a un esquema de existencia, más acorde a las lógicas del campo que de la ciudad [9].

Sin embargo, los factores económicos y sociales de los últimos años conforme a los datos suministrados por la alcaldía de la localidad, informan que este sector se encuentra

actualmente sobrepoblado por factores como el desplazamiento, de donde se infiere que gran parte de los lugares se desenvuelven en medio del hacinamiento ya que las zonas periféricas, están abocadas a convertirse en punto de llegada para migrantes de bajos recursos [10].

De acuerdo con las proyecciones poblacionales el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas DANE para el 2007, estimaba que la población total de la Localidad de Usme estaba cercana a los 314.431 habitantes, de los cuales 163.103 son mujeres y 151.328 son hombres, representando un 51,9 % y un 48,1 % respectivamente. En la zona son tan deficientes sus condiciones sanitarias que por ejemplo en la parte rural de la Localidad existen doce acueductos comunitarios que abastecen a gran parte de la población; sin embargo la calidad del agua tratada, de acuerdo con el análisis realizado por el Laboratorio de Salud Pública a muestras tomadas por el Hospital de Usme, muestra que el agua no es apta para el consumo humano. Así, el 84,6% del agua es aceptable y el 15,4% no lo es [10].

Además de lo anterior, las cifras ponen a Usme en cuarto lugar en recepción de familias traídas a la ciudad a través del desplazamiento forzado, con un 8,2% de esta población (por debajo de Ciudad Bolívar: 26,3%, Kennedy: 10,7% y Bosa: 10,1%), cifra que puede obedecer, primero, a la ubicación periférica de este sector, segundo, por la tradición rural en el desarrollo histórico de esta localidad, y tercero, dada la apatía, indiferencia y rechazo al cual se ven abocados estos sectores en las medias y altas esferas del contexto urbano. Lo anterior, se apoya en un indicador generado por los estamentos distritales y nacionales; así, mientras para el año 1997 el 32% de la población del sector se clasificaba 'pobre', luego del inicio del gran desplazamiento, alentado en gran medida por la eclosión del fenómeno de desplazamiento forzado, la consolidación de grandes extensiones de tierra para el monocultivo, la forzada implantación y desarrollo de las agroindustrias, llevaron el indicador para el año 2000 a un 49% [11].

En lo que respecta a las enfermedades transmisibles, en el 2007, se encontraron en Bogotá aproximadamente 1.200 personas con Tuberculosis, de las cuales 47 habitan en la Localidad de Usme. Ese mismo año, cinco fallecieron a causa de la enfermedad. En el 2008, se encontraron 29 nuevos casos, con tres mortalidades reportadas. De los 68 casos diagnosticados en la Localidad, 41 son adultos, cifra que representa el 60% de la población [11].

Es por esto que en la localidad de Usme a través del Proyecto de Desarrollo de Autonomía (PDA) se trabaja en metas con el fin de reducir los casos de enfermedades transmisibles. En el caso de la tuberculosis pulmonar, teniendo en cuenta que su vía de transmisión es aérea y en el momento que la persona enferma tose o estornuda se transmite la enfermedad, se estableció para lograr la reducción de casos de tuberculosis la búsqueda activa de sintomáticos respiratorios “toda persona con tos por más de 15 días con expectoración” tanto en los centros de salud de la localidad como la búsqueda con la comunidad con el fin de cumplir la meta distrital la cual apuntó a aumentar la detección de casos de tuberculosis en el Distrito Capital al 70% para el 2011 [5].

En base a las experiencias acumuladas en el transcurso del 2007, en la localidad de Usme, con comunidades de pacientes y sus redes familiares se identificó que ante la presencia del diagnóstico de Tuberculosis se enfrentan ante múltiples situaciones y sentimientos que afectan su calidad de vida, principalmente en las primeras etapas de

enfermedad. El común denominador es enfrentarse a una serie de barreras: a nivel institucional, personal, familiar, laboral que vulneran sus Derechos Humanos, lo cual se ve sustentado por los espacios sobrepoblados en la convivencia doméstica y en los lugares de desenvolvimiento, (trabajo, escuela etc.), las deficiencias de salud, fomentadas por factores alimenticios, el desempleo y el tratamiento de la sexualidad a tempranas edades [10].

Es así como el desempleo cercano al 50%, deriva en la búsqueda de lugares más accesibles para vivir, comúnmente más pequeños y con servicios básicos más restringidos, lo cual conduce a la cohabitación de pequeños espacios por grandes grupos de personas, favoreciendo el hacinamiento que incluye en ocasiones la ausencia de servicios públicos como agua, luz, teléfono etc. De esta manera, se puede decir que las enfermedades causadas por el hacinamiento, las malas condiciones de asepsia etc. radican no solo en aquellos que vivencian tales carencias, sino en la ausencia global de formas de subsistencia digna dentro del contexto de la capital, donde aparte de las malas condiciones de hábitat, hay agravantes como la subalimentación y la proliferación de enfermedades que se expanden ante la ausencia de anticuerpos, originados en la buena nutrición, sufridos principalmente por actores como amas de casa, desplazados, habitantes de la calle, estudiantes y trabajadores en general [10].

Actores más susceptibles al contagio de la tuberculosis	% de actor por defecto	% Mala nutrición (MN)	% Desnutrición crónica (DC)
Estudiantes	20,00%	***	15,00%
Trabajadores	35,00%	5,00%	5,00%
Amas de casa	35,00%	8,00%	7,50%
Desplazados	9,00%	8,00%	7,50%
Hab. de calle	1,00%	70,00%	10,00%
TOTAL	100,00%	***	***

Tabla 1. Cuadro de distribución estadística de agentes y factores incidental en la infección. Tomado Tesis de Grado “Modelo de epidemiología de tuberculosis en el hospital de Usme (localidad 5 de Bogotá D.C.), basado en agentes”.

En resumen la encuesta de calidad de vida de 2007, encontró que el 1,6% de los hogares tiene una vivienda inadecuada, el 0,4% tiene servicios críticos, y el 4,6% vive en condiciones de hacinamiento crítico. De las 75.070 viviendas estimadas en la localidad, (aproximadamente 4% de todas las del distrito) el 65,7% son casas, el 25,4% son apartamentos y el 8,9% son cuartos o algún otro tipo de vivienda; en este último tipo destacan construcciones en materiales no sólidos, producto del reciclaje e inestables, lo que sumado al hecho de construir en las rondas de los ríos, quebradas, colinas altas o medias, pone en riesgo la vida de los habitantes [12].

	Hogares	Hogares con vivienda inadecuada		Hogares pobres por Necesidades Básicas Insatisfechas (una o más NBI)		Hogares en miseria por Necesidades Básicas Insatisfechas (dos o más NBI)	
	Total	Total	%	Total	%	Total	%
Total Bogotá	1.978.528	13.832	0,7	4.635	0,2	52.154	2,6
Usme	77.292	1.252	1,6	342	0,4	3.575	4,6

Tabla 2. Cuadro del Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas, Usme, 2007. Fuente: DANE – SDP, Encuesta Calidad de Vida, Bogotá – 2007- Procesamiento: SDP, Dirección de Información Cartográfica y Estadística

Elementos del Trabajo y metodología

Modelos epidemiológicos

Se llama epidemia a una patología cuando aparece periódicamente en una población, en un ciclo de infección- curación a través de largos periodos de tiempo; caso contrario se considera una enfermedad endémica, cuando esta se presenta recurrentemente en las personas, permaneciendo entre estas. Tales patologías pueden ser explicadas teniendo como base el sistema presa depredador. Se tiene así el supuesto de la existencia de una cantidad 'N' de pobladores que es estable, donde las condiciones de salud de los pobladores puedan ser contenidas dentro de un esquema, donde tales variables resultan útiles en la medida que sobre ellas se establece un carácter valorativo, a través 'umbrales', considerados como los valores críticos asociados a la reproducción, número de contacto, tamaño de la población, o densidad del vector que debe excederse para que una epidemia ocurra o para que una enfermedad permanezca endémica [13].

Así, existen estados que pueden describir la salud de una persona respecto a la patología:

- ⤴ M: simboliza el factor materno de inmunidad, traspaso de anticuerpos de la madre al feto, que lo hacen inmune a ciertas patologías, protegido al interior de su progenitora, aislado de las infecciones de ésta gracias a la placenta, y al mismo tiempo, adquiriendo inmunidad pasiva.
- ⤴ S: susceptible, cuando una vez nacido, el cuerpo del niño comienza a perder la condición de resistencia pasiva dada por la madre, lo que hace que pase del estado 'M', al estado en donde es posible contraer una enfermedad, donde está 'susceptible'.
- ⤴ E: expuesto, estado generado por el contacto entre una persona susceptible y una persona infectada, donde la persona es propensa a adquirir la patología, iv) 'I': infectado, como resultado de la exposición que condujo a una transmisión de la enfermedad.
- ⤴ R: removido, cuando el periodo infeccioso acaba, originando a veces la condición de inmunidad permanente respecto una afección en la salud, donde la persona ha desarrollado una resistencia natural a esta. De lo anterior que se constituyen siglas

que representan el comportamiento general de una enfermedad, es decir, un modelo epidemiológico [13].

Se observan así los siguientes modelos: MSEIR, MSEIRS, SEIR, SEIRS, SIR, SIRS, SEI, SEIS, SI, y SIS. Más adelante se ampliará el modelo SIR epidémico, dado que este modelo es competente a la tuberculosis.

Realizando una descripción general de las patologías, se halla que existe una población susceptible, la cual respecto una población total 'N' se describiría: $s(t) = S(t)/N$; y una población infectada determinada por: $i(t) = I(t)/N$. También se puede establecer a nivel general, la existencia de una variable β , que representa el contacto mínimo requerido entre personas para que sea posible la eclosión de una enfermedad, número que no depende de manera directa del tamaño 'N' la población, o que varía estacionalmente. β varía de manera particular con cada enfermedad, pero a nivel general se dice que el número de contactos infecciosos por unidad de tiempo se describe como: $\beta I/N = B_i$; de donde resulta que los nuevos casos de contagio son con base a la población susceptible a la patología, es decir: $(\beta I/N)S = \beta N$, esta representación es llamada incidencia estándar o incidencia frecuencia-dependencia [13].

Modelo SIR epidémico

El modelo (Susceptible, infectado, removido) en estado epidémico, es decir, que no convive de manera cotidiana con la población, es aquel que se constituye en fundamento del presente estudio, en la medida que representa la forma de comportamiento de la tuberculosis, es así, que a través de las ecuaciones diferenciales del mismo, se puede dar cuenta de algunas características de la mencionada patología. Matemáticamente se expresa así:

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= -\frac{\beta I S}{N}, & S(0) &= S_0 \geq 0, \\ \frac{di}{dt} &= \beta I S - \gamma i, & i(0) &= i_0 \geq 0, & (1) \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I, & R(0) &= R_0 \geq 0, \end{aligned}$$

Ecuación 1 . Modelo SIR epidémico

Lo que conlleva a:

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= -\beta I S, & s(0) &= i_0 \geq 0, \\ \frac{di}{dt} &= \beta I S - \gamma i, & i(0) &= i_0 \geq 0, & (2) \end{aligned}$$

Ecuación 2. Resultantes del modelo SIR epidémico.

Donde se observa que:

⤴ La proporción de casos susceptibles respecto al tiempo, está avocada a presentarse en una parte restringida de la población, sector particular dónde tiene la

posibilidad de desarrollarse. De ahí, que represente una tendencia negativa, en tanto los que se ven amenazados por estas afecciones cada vez son más específicos (menos casos de la 'enfermedad libre') dentro de un sector.

▲ Se observa que la proporción de infectados respecto al tiempo, toma como referencia a los posibles infectados por contacto entre toda la totalidad, sustrayendo de esta cantidad los posibles nuevos casos, porque los casos se mantienen sólo en ciertas personas de determinadas características.

Por ejemplo, la tuberculosis se asocia a una deficiencia en el sistema inmunológico de las personas, originada comúnmente es estados de subnutrición; a pesar de contener un riesgo inclusive mortal, puede ser controlada y erradicada de una población a través del tratamiento correcto (TAS). Es así que la proporción de casos removidos, ha de ser directamente proporcional al surgimiento de casos infectados, porque las características de la enfermedad, hacen que esta solo esté presente en ciertos organismos con determinadas condiciones, comúnmente agrupados bajo un signo común: deficiencias inmunológicas (casi siempre derivadas de carencias alimentarias), signo perteneciente a un sector específico de la población, proclive a enfermar. Dicho en otras palabras, el modelo SIR epidémico de la tuberculosis, describe patologías que eclosionan en un momento específico y en un sector puntual, que las desarrolla dadas sus condiciones de existencia (ausencia de alcantarillado, de agua potable, de vivienda digna, de servicios de salud, de alimento etc.), bajo la suposición, de que tal sector poblacional ha de ser asistido para eliminar la enfermedad de él [14].

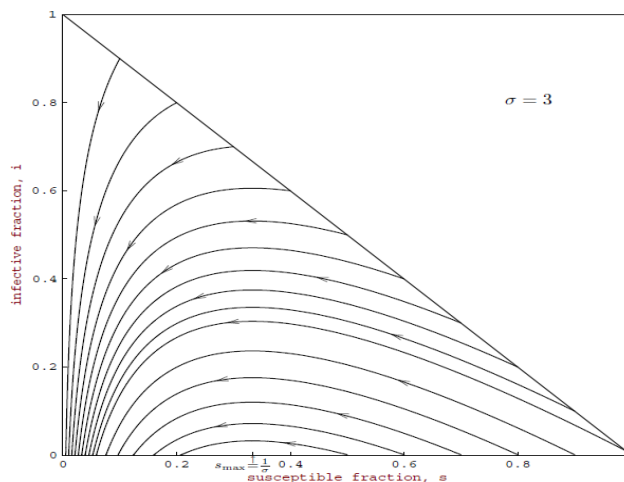


Figura 2. Diagrama de fase entre la proporción de población infectada y proporción susceptible. Fuente: “Fundamentos de epidemiología”, 2009.

La epidemia modelada a través del modelo SIR para casos epidémicos, evidencia que los casos de susceptibilidad respecto a los infectados, se dan sobre estos mismos, es decir, que la epidemia no se expandirá en la totalidad de la población, sino en una proporción de esta que permanece vulnerable frente a la enfermedad. La epidemia en un momento, no encuentra un nuevo sujeto al cual infectar, esta llega a un umbral de expansión, en la medida que el resto personas se encuentran inmunes o en un menor grado de susceptibilidad como se observa en la Figura 3.

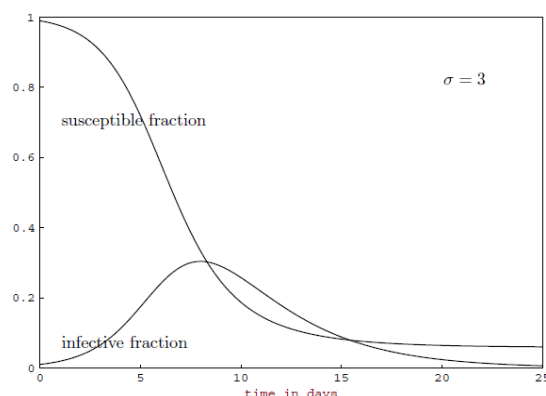


Figura 3. Gráfica de fracciones infectada y susceptible, respecto a la cantidad de casos y el tiempo. Fuente: “Fundamentos de epidemiología”, 2009.

Así, el estudio de la eclosión de la tuberculosis, haya un punto de asiento en la medida que un factor bio-social, puede ser descrito a través de relaciones discretas, de modo que se hace posible construir un esquema para la difusión de esta enfermedad en una población dada, traspasando los datos de los que se dispone a las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento de esta [15].

Teoría General de Sistemas y el Estudio de Fenómenos Epidemiológicos

La Teoría General de Sistemas es una disciplina que investiga los conceptos, métodos y conocimientos pertenecientes a los campos y pensamiento de sistemas. La fuente de la Teoría General de Sistemas puede remontarse probablemente a los orígenes de la ciencia y la filosofía, sin embargo, la necesidad y factibilidad de un nuevo enfoque no fue evidente hasta cuando Ludwing Von Bertalanffy en el año de 1954, acuñó el concepto de Teoría de los Sistemas Generales, para referirse a la descripción matemática de los sistemas definibles sobre la naturaleza [16].

El modelado basado en dinámica de sistemas fue desarrollado por Jay W. Forrester y ha cobrado relevancia en los últimos años ante la necesidad de modelar sistemas complejos ya que el énfasis de la dinámica de sistemas no está en predecir el futuro, sino en aprender cómo las acciones en el presente pueden desencadenar reacciones en el transcurso del tiempo. Aún cuando los fenómenos de transmisión de enfermedades hacen parte del campo biológico y por lo tanto son considerados sistemas vivos, abiertos y complejos, no es posible determinar con cierto grado de certeza el valor de constantes o tasas de cambio, por lo que este tipo de modelos se utiliza como herramienta de aprendizaje para determinar caminos causales y factores relevantes [16].

Se define entonces un sistema dinámico como un sistema complejo que presenta un cambio o evolución de su estado en un tiempo. El comportamiento en dicho estado se puede caracterizar determinando los límites del sistema, los elementos y sus relaciones; éstos representan su estructura a través de modelos. El concepto de sistema dinámico, aporta un lenguaje más elaborado que permite generar el comportamiento de uno o más bucles de realimentación [17].

Específicamente en el modelo epidemiológico SIR construido a partir de un Diagrama de Forrester se observa la variación de las poblaciones involucradas en el modelo con respecto al tiempo, debido a la dinámica sistémica de las interacciones entre las variables [18].

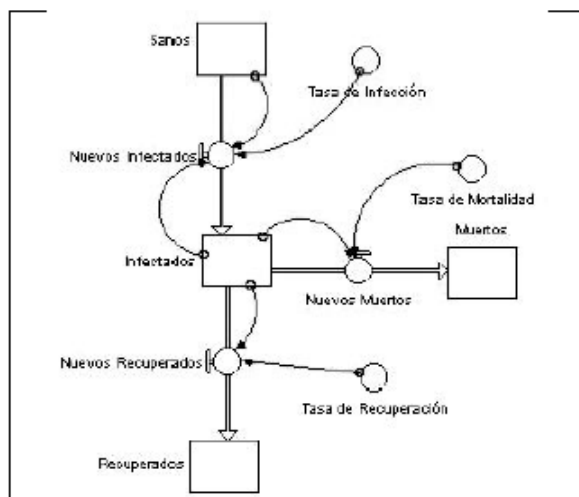


Figura 4. Diagrama de flujo Forrester par un SIR con muertos. Fuente: “Fundamentos de la dinámica de sistemas y Modelos de dinámica de sistemas en epidemiología”. Disponible en http://www.dia.uned.es/~fmorilla/MaterialDidactico/DS_contenidos.pdf

Desarrollo del Modelo

Para el presente estudio, se construyó un modelo basado en Dinámica de Sistemas para la tuberculosis en la localidad de Usme, a través de un cambio de enfoque de la tecnología que busca relacionarse directamente con las condiciones socio- económicas en dicha localidad, explicando en su conjunto uno o varios fenómenos de la vida cotidiana de sus habitantes. El modelo permite entender cómo estos aspectos se combinan para conducir a un estado preocupante de la evolución de la tuberculosis, por lo que se modificó el modelo SIR, a un modelo que considerara adicionalmente, los Aislados, no Aislados y Muertes

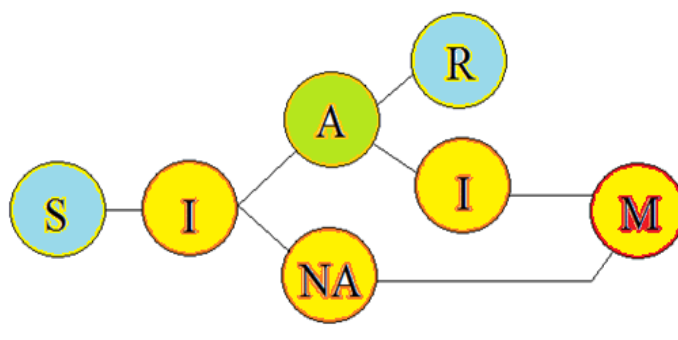


Figura 5. Modelo reformando modelo SIR. Dónde: S) Susceptible, I) Infectado, A) Aislado, R) Removido, NA) No Aislado, M) Muerto. Tomado Tesis de Grado “Modelo de epidemiología de tuberculosis en el hospital de Usme (localidad 5 de Bogotá D.C.), basados en agentes”

El modelo de la figura intenta plasmar las particularidades sociales y por ende biológicas de la población de Usme, considerando que el modelo en ecuaciones diferenciales para la tuberculosis pulmonar es el SIR, pero considerando que un paciente en deficientes condiciones de vida, puede: primero, asumir el tratamiento y abandonarlo, al punto que la reincidencia lo lleve a la muerte, o segundo, que puede no someterse nunca al tratamiento hasta el momento de su deceso. Al igual que existe una población mayoritaria que puede iniciar su proceso de curación, y llevarlo hasta el término satisfactoriamente. Los valores asumidos para realizar el modelo de esta manera, son los obtenidos por las estadísticas de la localidad de Usme, asignando una mayor probabilidad de contagio y reincidencia, para aquella proporción de la población que se halla en el rango de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI), o en la miseria, según el mismo indicador, enfocando la mayoría de esta población a las personas desplazadas y habitantes de la calle.

Diagramas Causales

Los diagramas causales representan las relaciones de influencia que se dan entre los elementos de un sistema y por lo tanto permite conocer la estructura del mismo. La relación entre una variable A y otra B del sistema se representará mediante una flecha, leyéndose "A influencia a B". Sobre la flecha se indica mediante signo + o - el tipo de relación siendo positiva cuando las variaciones de A y B son del mismo sentido, y negativa en caso de variación de sentido contrario.

$$A \xrightarrow{+} B, \quad A \xrightarrow{-} B$$

El desarrollo del diagrama causal es un proceso que implica la realización de:

- Observaciones sobre el sistema
- Discusiones con especialistas
- Análisis sobre datos del sistema

El proceso seguido en el desarrollo sigue los pasos a continuación:

1. Elección de variables o elementos a representar del modelo del sistema.
2. Evaluación cualitativa (no numérica) de las relaciones entre estos elementos cuando las hubiere.
3. Construcción del diagrama causal [18].

Para la elaboración del Diagrama Causal del presente estudio se establecieron los siguientes niveles: Población Susceptible (PS), Población Infectada (PI), Población Aislada (PA), Población No Aislada (PNA), Población Recuperada (PR) y Muertes (M)

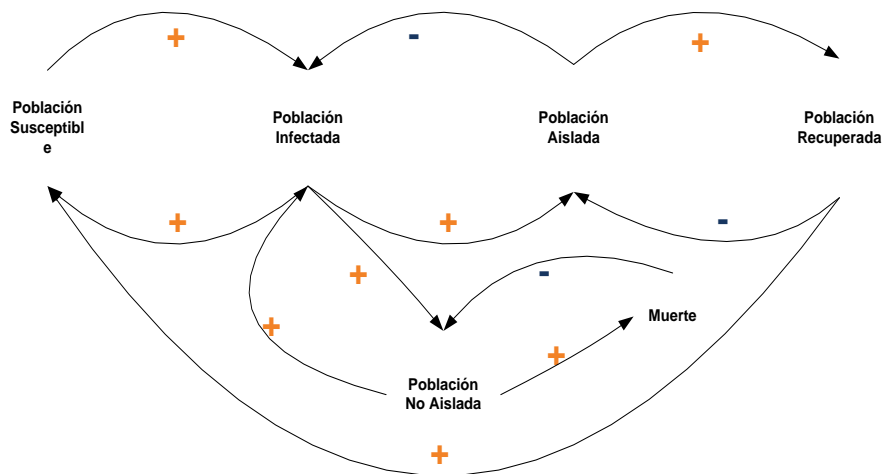


Figura 6. Diagrama Causal Tuberculosis.

Diagramas de Forrester

El diagrama de Forrester es una representación simbólica de las variables de nivel, flujo y auxiliares de un diagrama causal una vez identificadas y constituye un paso intermedio entre el diagrama causal y el sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden que le corresponde [18]. Para ello se estableció el comportamiento del sistema, determinando las relaciones existentes entre las variables a través de diagramas causales, identificando los bucles de realimentación. A continuación se presenta el diagrama que corresponde al modelo epidemiológico para Usme.

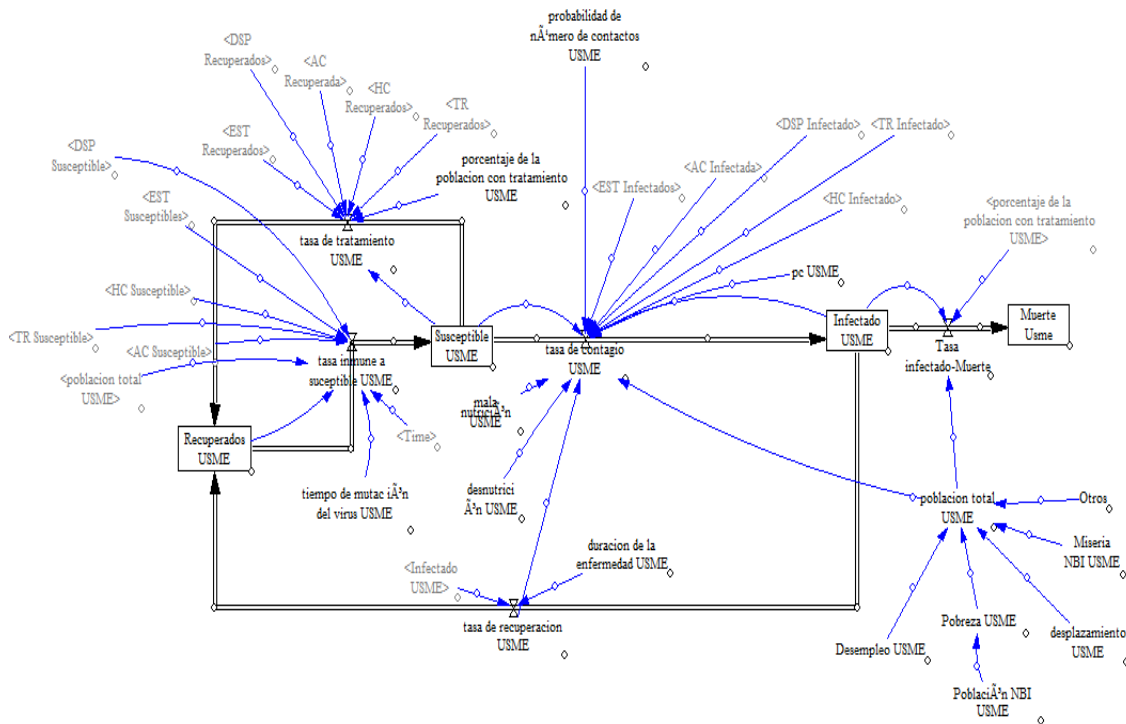


Figura 7. Diagrama de Forrester Tuberculosis.

Resultados

El modelo construido fue simulado para el periodo de doce meses. La simulación muestra el comportamiento de los niveles y las condiciones que favorecen su contagio como es el desplazamiento, la miseria, la pobreza, entre otros, validando la información existente.

El principal obstáculo para calibrar el modelo de simulación fue la falta de datos estadísticos adecuados que permitan ponderar el impacto de los diferentes determinantes socio-económicos y factores de riesgos sobre la prevalencia de la enfermedad. Por lo tanto, se procedió de la siguiente forma: se tomó como base el modelo de la dinámica de la tuberculosis calibrado con datos del DANE, Datos de la Alcaldía de Bogotá D.C., datos publicados por la Alcaldía Local de Usme y la Tesis de Grado “Modelo de epidemiología de tuberculosis en el hospital de Usme (localidad 5 de Bogotá D.C.), basados en agentes”.

La calibración del modelo establece que en promedio por año se infectan en la localidad de Usme 15 personas y fallecen en promedio 3 como se muestran en las figuras 8 y 9

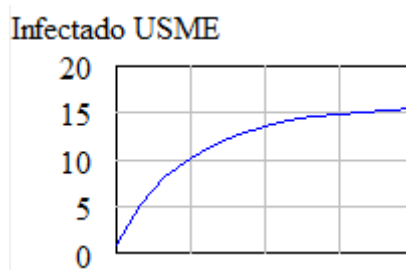


Figura 8. Número de infectados con tuberculosis

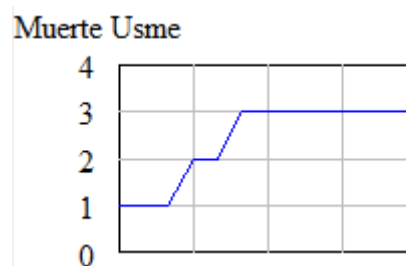


Figura 9. Número de muerte por tuberculosis

A continuación se plantearon dos escenarios: el primero (en rojo) está definido a que todas las personas diagnosticadas con tuberculosis terminen el tratamiento, lo que garantiza que no habría muerte por este tipo de causa: el segundo escenario está enfocado a disminuir los índices de pobreza, miseria, desplazamiento, desempleo pueden ayudar a reducir las muertes ocasionadas por esta enfermedad (azul).

VARIABLES	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3
DESEMPLEO USME	0,500	0,500	0,300
POBLACION NBI USME	0,091	0,091	0,070
DESPLAZAMIENTO USME	0,082	0,082	0,050
MISERIA NBI USME	0,010	0,010	0,010
MALA NUTRICION USME	0,700	0,700	0,400
DESNUTRICION USME	0,100	0,100	0,050
PORCENTAJE DE POBLACIÓN CON TRATAMIENTO	0,700	1,000	0,700

Tabla 3. Variables por escenarios análisis de tuberculosis

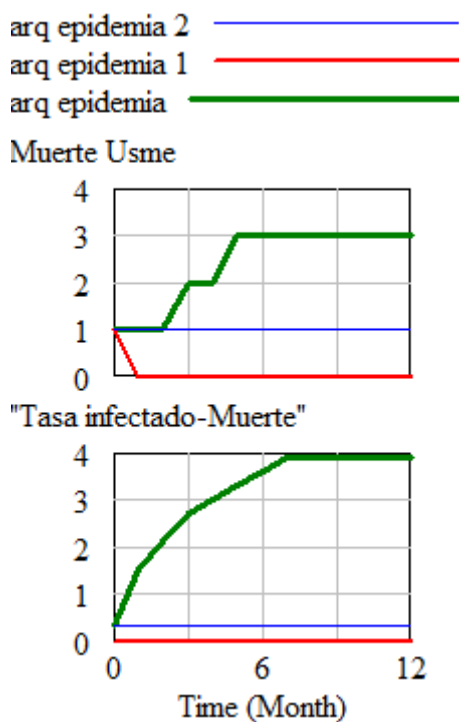


Figura 10. Gráfica muerte y Tasa de infectados Usme.

Time (Month)	"Muerte Usme"	Muerte Usme		
0	Runs:	1	1	1
1	arq epidemia 2	1	0	1
2	arq epidemia 1	1	0	2
3	arq epidemia	1	0	2
4		1	0	3
5		1	0	3
6		1	0	3
7		1	0	3
8		1	0	3
9		1	0	3
10		1	0	3
11		1	0	3
12		1	0	3

Figura 11. Datos muerte por escenario

Es así, como la modelación de la propagación de epidemias por medio de la dinámica de sistemas es útil en cuanto permite ver el comportamiento de la enfermedad y como este se ve afectado por los factores de desnutrición, mala nutrición, y necesidades básicas insatisfechas entre otros factores. Lo anterior demuestra que al no poseer unas condiciones de existencia digna, donde no se cuenta con el apoyo económico, educativo y preventivo de los entes de control, aumenta la probabilidad de muerte de la población más vulnerable, que aparte de sus problemas sociales tienen que convivir con la posibilidad de contraer enfermedades que como la tuberculosis no solo afecta el sistema respiratorio de las personas, sino su entorno.

La muerte como la consecuencia más fatal de la tuberculosis, se apoya en la ausencia de anticuerpos en medio de una coinfección y particularmente en Usme por las condiciones anteriormente descritas, confina a un grupo de personas a estar expuesta a este tipo de enfermedades, dado que sus condiciones de salud, sus orígenes, sus bajos niveles de instrucción, se concentra en sectores específicos, lo que pone de manifiesto un efecto de segregación causado por la carente salubridad, pobreza, desplazamiento y falta de políticas de higiene y nutrición.

Discusión

Pese el gran optimismo de las entidades del regente distrital en cuanto al tratamiento de esta enfermedad, es notable que estas medidas han sido insuficientes dado que la salud de la población es un derecho vital, el cual va a tener sentido y por ende cumplimiento, en el momento en que se relacionen las condiciones socio-históricas y socio-económicas, respecto a las afecciones en la salud de las personas; es decir, en tanto se desarrollen planes integrales donde se superen factores sociales de existencia de poblaciones vulnerables (el desempleo, hacinamiento, analfabetismo, hambre etc.), con las condiciones de la salud de las personas; por ello la reducción de las diferencias sociales y el mejoramiento de las necesidades básicas pueden ayudar a contribuir con la disminución del contagio de enfermedades mortales como la tuberculosis.

Debido a que algunas enfermedades como la tuberculosis, pueden propagarse como epidemias, haciendo que el caso de un individuo pueda perjudicar a toda una población, se deriva que el uso de la ingeniería debe apoyar con la toma de decisiones mediante el uso de recursos informáticos y computacionales; y aunque en Colombia, la colaboración que la tecnología ha brindado para dar ayuda a la población más necesitada, ha sido insuficiente y la capital no se encuentra exenta de este panorama; se debe establecer como una prioridad, promocionar, patrocinar y desarrollar estudios que apunten a contribuir con problemas sociales a partir de la ingeniería, como una forma práctica de variar el objetivo de las tecnologías dentro del contexto actual, orientándolas al cuidado de las poblaciones, como herramienta de soporte para los entes gubernamentales, al igual que para las entidades de salud; donde la vida de las personas, y en especial de las poblaciones vulnerables, se asuma como un tema de primer orden en la agenda del gobierno Nacional y Local.

Agradecimientos

A la Universidad Central; Universidad Distrital Francisco José de Caldas; a la Dirección del Hospital de Usme, en especial a la gerente Liliana Paternina y a todo al personal médico y administrativo.

Referencias

- [1]. Organización Panamericana de la Salud, 2010. Casos de tuberculosis en Colombia [consulta:2010-06-12]. Disponible en: http://new.paho.org/col/index.php?searchword=TUBERCULOSIS&ordering=&searchphrase=all&Itemid=1&option=com_search
- [2] Aracil, J. ,1995, Dinámica de Sistemas. Primera Edición, Madrid: Gráficas Marte, S.A.
- [3]. Armas L, González E, Hevia G. y Peláez E., 1996. Elementos del diagnóstico clínico y el tratamiento de la tuberculosis. Revista Cubana de Medicina General Integral,. Vol 12 No 1. La Habana, Cuba, pag 59-68
- [4]. Ribón, W. y Bonilla, C., 2010. El retorno a lo esencial en salud pública como un instrumento poderoso para la gestión en el control de la tuberculosis. Revista de los estudiantes de medicina de la Universidad Industrial de Santander. Santander, Colombia, Vol 23, 1. [consulta:2010-06-12] Disponible en: <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistamedicasuis/article/view/980/1342>
- [5]. Corredor, L. 2011., Boletín Epidemiológico Capitulo I Hospital De Usme E.S.E. I NIVEL. Alcaldía Mayor de Bogotá, Primer trimestre.
- [6]. Castro, C., Londoño L. y Valdés J.,2005., Modelación y Simulación Computacional usando sistemas de información geográfica con Dinámica de Sistemas aplicados a fenómenos epidemiológicos.Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. No 034, pp 86-100. Antioquia, Colombia.
- [7]. Ospina, S. 2011, La tuberculosis, una perspectiva histórico-epidemiológica. Asociación Colombiana de Infectología,. vol.5 No.4 Bogotá, Colombia.
- [8] . Vásquez., J. 2008, La evaluación económica y el diagnostico de la tuberculosis extrapulmonar. . Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. Revista Gerencia Política y Salud. Vol. 7, No 15, pag 115-130. Bogotá, Colombia.
- [9]. Ministerio de la Protección Social (2009). Plan Estratégico Colombia Libre de Tuberculosis 2010-2015 Para la Expansión y Fortalecimiento de la Estrategia Alto a la TB, Tercera edición, Bogotá (Colombia).
- [10]. Moreno, Luis. (2012). Modelo basado en agentes para la tuberculosis en Usme (Localidad 5 de Bogota D.C). Tesis opción de Grado Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería. Colombia.
- [11]. Alcaldía Mayor de Bogotá, 2009. Secretaría de Salud Distrital. La salud y la calidad de vida. Localidad 5 Usme, Bogotá, Colombia.
- [12]. Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, 2012., Consulta [2012-04-06], Disponible en: http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=73&Itemid=119
- [13]. Lizarazo, O., González, C., Andrade, H. y García , C., 2000. La ingeniería de sistemas aplicada al estudio de fenomenos epidemiologicos. Grupo SIMON de Investigaciones, Universidad Industrial de Santander.
- [14]. Ahlbon A., Alfredsson L., Alfvén A., 2009, Fundamentos de epidemiología; nueva edición revisada y ampliada. Editorial SigloXXI. México, Méjico DF.
- [15]. Vázquez, K., Monzón, M y Hernández, J. ,2007. Modelo “SIR” para epidemias: Persistencia en el tiempo y nuevos retos en la era de la Informática y las pandemias. Revista Cubana Informática Médica, Volumen 7, 2. Recuperado el 25 de abril de 2010 de http://www.rcim.sld.cu/revista_13/articulos_htm/modelosir.htm.

[16]. Caro, L. y Goyhenecha, C. (2006). Diagramas de Forrester “El diagrama característico de la Dinámica de Sistemas”. Universidad Tecnológica Metropolitana, Facultad de Ingeniería, Escuela de Industria. Chile. Recuperado el 5 de mayo de 2011 de <http://www.youblisher.com/p/44894-Please-Add-a-Title/>

[17]. Sanchez, M. (2010). Utilización de Sistemas Dinámicos para Evaluar el Impacto de Factores de Riesgo y Determinantes Sociales en el Desempeño de Políticas Sanitarias. Universidad Nacional del Sur. XV Congreso de Contaduría Administración e Informática. Argentina. Recuperado el 22 de octubre

[18]. Donado, J. Dormido, S., Morilla F., 2005 Fundamentos de la dinámica de sistemas y Modelos de dinámica de sistemas en epidemiología. Madrid, España. Consultado [10-10-2010], Disponible en http://www.dia.uned.es/~fmorilla/MaterialDidactico/DS_contenidos.pdf

Datos de Contacto:

Liliana Maria Pantoja Rojas. Bogotá, Colombia. Ministerio de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones República de Colombia. Universidad Central. e-mail: lm_pantojar@yahoo.com

Luis Gabriel Moreno Sandoval Bogotá, Colombia. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. e-mail: gabrielmoreno10@gmail.com