

# DISEÑO METODOLÓGICO PARA LA UBICACIÓN DE AMBULANCIAS DEL SECTOR DE ATENCIÓN PREHOSPITALARIA EN BOGOTÁ D.C. 1

## METHODOLOGY DESIGN TO ASSIGN AMBULANCES FOR PRE-HOSPITAL CARE IN BOGOTÁ D.C.

*ANDRÉS ERNESTO ROJAS ORTEGA* <sup>2</sup>

*LINDSAY ALVAREZ POMAR* <sup>3</sup>

*JAVIER PARRA PEÑA* <sup>4</sup>

Ingeniería Industrial. Facultad de Ingeniería.  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, D.C. – Colombia.

### RESUMEN

La asignación de ambulancias para la atención prehospitalaria de Bogotá, es administrada por el Centro Regulador de Urgencias, el cual tiene la difícil tarea de brindar el servicio a los pacientes que así lo requieran, dentro del perímetro urbano de la ciudad, en un tiempo razonable debido a que la vida está en juego. Se propone una metodología para la asignación de ambulancias que contempla una fase de programación lineal para establecer las zonas donde se concentra la demanda, posteriormente se determina la cantidad óptima de ambulancias para cada zona, utilizando la misma técnica. En una segunda etapa se emplea la simulación para validar los resultados.

**PALABRAS CLAVE:** Ambulancias, Atención prehospitalaria, Programación Lineal, Simulación.

### ABSTRACT

The Urgency Regulator Center (CRU) assigns ambulances to pre-hospital care in Bogotá, to serve the customers in a short time in order to preserve the live. A methodology design is proposed based in linear programming in two phases, the first one to determine zones of demand and the second one to assign ambulances for each zone. Then through a simulation model the results are proved.

**KEY WORDS:** Ambulances, linear programming, pre-hospital care, simulation

---

<sup>1</sup> Primer Lugar Competencia de Simulación en el marco del 1<sup>er</sup> Encuentro Latinoamericano de Académicos de Ingeniería Industrial (ELAIN) & XVI Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ingeniería Industrial, Santa Cruz de la Sierra – Bolivia.

<sup>2</sup> e-mail: andreserojaso@hotmail.com

<sup>3</sup> e-mail: lalvarez@udistrital.edu.co – lindsayalvarez@yahoo.com

<sup>4</sup> e-mail: javparrap@gmail.com

## 1. INTRODUCCIÓN

El Ministerio de Protección Social, promovió la creación de Centros Reguladores de Urgencias (CRU) como estructuras locales para direccionar Sistemas de Emergencias Médicas (SEM). En Bogotá se conformó el CRU en 1996 y se inició el programa de atención prehospitalaria (APH) en 1997. El CRU actualmente brinda la APH solicitada por la línea 125 y envía una ambulancia tripulada por conductor y médico (RUBIANO & PAZ, 2003).

A partir del año 2003 se observa un aumento de la demanda, lo que trae efectos en el servicio. Ante esto el CRU ha capacitado a la sociedad en procedimientos médicos básicos e inmediatos, requeridos en un evento médico urgente; para que cualquier persona pueda estabilizar y mantener el estado de salud del paciente mientras llega la ambulancia. Además, la carencia de herramientas tecnológicas para soportar la toma de decisiones, el bajo conocimiento del sistema y el aumento de la demanda.

Se propone una metodología basada en programación lineal y simulación para localizar y determinar la zona de movilidad de las ambulancias, brindando a la gerencia un apoyo en la toma de decisiones e implantación de acciones encaminadas a la mejora del tiempo de arribo y de la planeación del sistema.

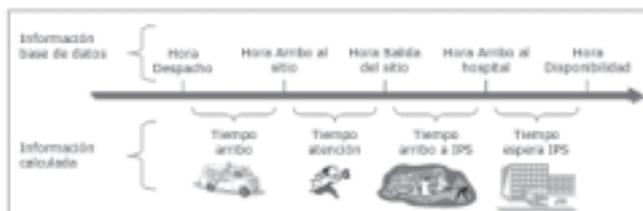
El tiempo transcurrido entre la llamada del paciente y la atención por parte del médico es crítico, para la salud de los usuarios; las consecuencias de un evento médico no atendido oportunamente pueden tener una grave repercusión para el paciente y su familia. La organización, por su parte presenta congestión de llamadas, quejas y reclamos, y costos por la pérdida del valor de su "buen nombre". Influyen en el tiempo de reacción factores externos como el estado de las vías, obras viales y demora en la recepción de pacientes en las salas de urgencia.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### APLICACIÓN DE PROGRAMACIÓN LINEAL Y MODELAMIENTO EN EL PROCESO DE APH DEL CRU.

La información empleada es extraída de la base de datos de atenciones prehospitalarias del CRU de Bogotá entre los años 2003, 2004 y 2005, la cual contiene información como: Fecha, Dirección de origen, Hora de despacho, Hora de llegada al origen, Hora de salida del evento, Hora de llegada al destino, Hora disponible e Institución destino.

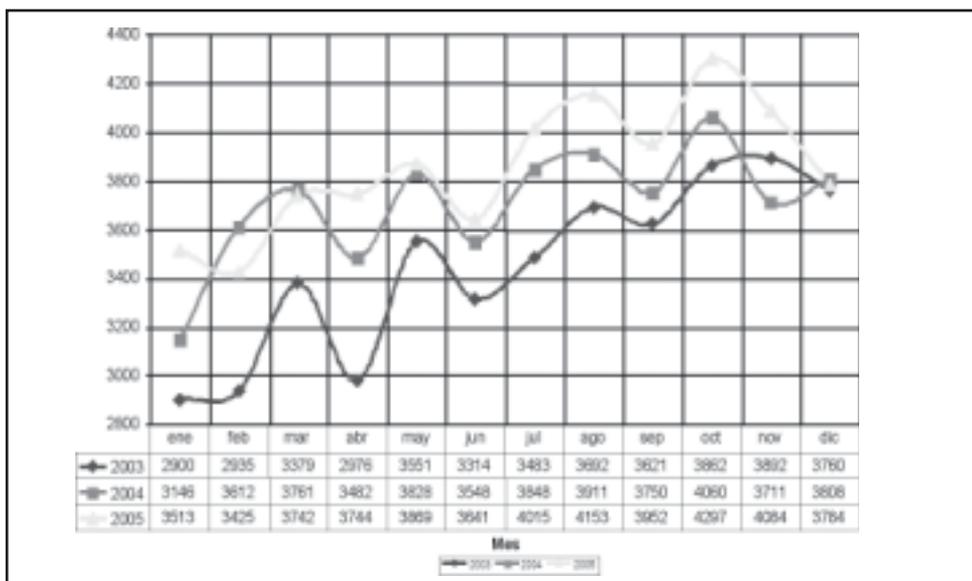
A partir de las fechas se identificaron los correspondientes: día de la semana, mes y año, se georreferenció la demanda y se calculó su proporción por zonas, se calcularon además los tiempos de arribo, los tiempos de atención, tiempo de arribo a la IPS, tiempo de espera en la IPS, distancia y velocidad promedio. Además se tabuló la demanda por horas de ocurrencia. La Figura 1 muestra el proceso de APH.

**Figura 1.** Actividades del proceso de APH primaria en el CRU Bogotá.

Fuente: Elaboración propia, por observación del sistema.

## DETERMINACIÓN DEL PERIODO CRÍTICO DE DEMANDA DE APHS PRIMARIAS

La APH primaria es aquella que requiere atención médica urgente mientras que la secundaria es la que implica traslado entre hospitales. La tendencia desde el año 2003 muestra un crecimiento hacia el futuro de atenciones primarias.

**Figura 2.** Demanda atenciones primarias por mes. Años 2003, 2004 y 2005.

Fuente: Elaboración Propia.

Durante los años 2003, 2004 y 2005 fueron solicitadas al CRU 128.265 atenciones primarias. Encontrándose que el segundo semestre del año tiene mayor demanda que el primero, en especial los meses de octubre y noviembre. Al parecer de los administradores del sistema y médicos las causas principales del incremento de solicitudes año es la temporada de lluvias y un cambio de sepa de virus que ataca a la población de adultos mayores y adultos o niños con problemas respiratorios (Zambrano, 2006).

Los periodos de mayor demanda mensual y diaria son considerados en este estudio, para encontrarlos se buscó el mes de mayor demanda y luego se comparó con los restantes utilizando la prueba de hipótesis con respecto a las medias y la prueba de Kruskal-Wallis, con

el propósito de utilizar la estadística paramétrica y no paramétrica para probar la hipótesis de igualdad de medias. Inicialmente se hallan los meses críticos y de estos los días críticos.

### **PERIODOS DE ALTA DEMANDA DEL CRU PARA LOS AÑOS 2003, 2004 Y 2005.**

Los meses de mayor demanda, que presentan igualdad estadística de medias con el mes crítico son noviembre de 2003, octubre de 2004, septiembre, octubre y diciembre de 2005, todos ellos en el segundo semestre del año, repitiéndose los meses de octubre y noviembre, consistentemente con la temporada de lluvias.

Del mismo modo se procedió a identificar los días críticos, encontrándose la mayor demanda un sábado con 183 atenciones, con 7.62 atenciones por hora en promedio y desviación estándar de 3.41. Las pruebas estadísticas fueron aprobadas para 74 de 204 días, correspondiendo a 11008 atenciones distribuidas en un 66% en los días viernes, sábado y domingo y el restante en los días lunes, martes, miércoles y jueves.

Con las 11008 atenciones se analizará la cantidad de solicitudes de atención primaria canceladas y cumplidas, la proporción de demanda por zonas en Bogotá y comportamientos de frecuencia de demanda del sistema, tiempo de arribo de ambulancia al paciente, atención médica en el sitio del evento, arribo al hospital y espera en el hospital.

### **PROPORCIÓN DE SOLICITUDES DE ATENCIONES PREHOSPITALARIAS PRIMARIAS CUMPLIDAS Y CANCELADAS.**

En cada actividad del proceso de APH hay una proporción de solicitudes que continúan en el sistema y otras que son canceladas y fueron calculadas según 11008 atenciones de los días de mayor demanda promedio de atenciones primarias del CRU entre los años 2003, 2004 y 2005 y luego fue estimado el intervalo de confianza de la proporción al 95% como lo desarrolla Hildebran y Lyman.

Con el propósito de validar estadísticamente la información de las proporciones se realizó una prueba de hipótesis para comparar proporciones en dos muestras, comparando esta información con varias muestras aleatorias representativas de tamaño de 400 datos y se verificó la hipótesis nula sobre la igualdad estadística de la proporción de los datos.

### **DETERMINACIÓN DE ZONAS MEDIANTE PROGRAMACIÓN LINEAL**

Para los 74 días con 11008 atenciones, periodo crítico del sistema, se generó una muestra aleatoria e independiente que representara con un nivel de confianza del 95%, el error de 5% y una proporción del 0.5 <sup>5</sup> el periodo crítico del sistema utilizando la formula <sup>6</sup>:

$$n = \frac{Nz_{\alpha/2}^2 P(1-P)}{(N-1)e^2 + z_{\alpha/2}^2 P(1-P)}$$
$$n = 718.25 \approx 719$$

Utilizando el complemento análisis de datos-muestra de Microsoft Excel fue generada la muestra aleatoria e independiente de tamaño de 719 datos que se georreferenciaron utilizando el programa ArcviewGis 3.0, calculando además las distancias entre hospitales y el sitio del

<sup>5</sup> La proporción 0.5 maximiza el tamaño muestral.

<sup>6</sup> Disponible en Internet: <http://www.fisterra.com/material/investiga/8muestras/8muestras.htm>

evento médico según la norma euclídea. Obtenidas las distancias entre dos puntos se contrastó con el tiempo de arribo y se halló la velocidad promedio utilizando la fórmula  $v=x/t$ .

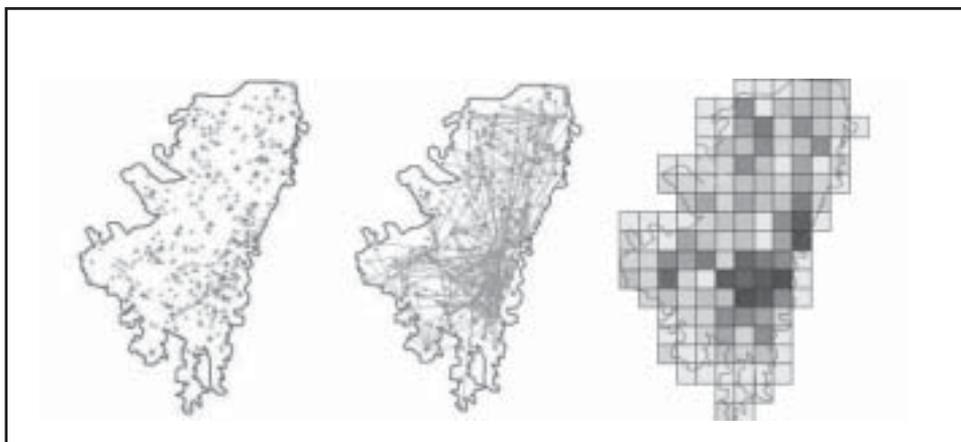
Además, se estableció un conjunto de distritos rectangulares, para analizar la distribución de la demanda, en esta la distancia diagonal de los vértices opuestos del cuadrado es igual a lo recorrido por una ambulancia en 8 minutos.

De la georreferenciación de la demanda se determinó la proporción geográfica encontrándose que la zona centro de Bogotá tiene una mayor demanda del servicio de APH primaria mientras que algunos de los rectángulos del periferia tienen una ocupación de 0%. Como se puede observar en la Figura 3.

Empleando un programa lineal propuesto por Revelle y Swain en 1970, que minimiza la distancia media o el tiempo, se determinó las zonas para cinco hospitales base: Simón Bolívar, Engativa, Kennedy, El Tunal y La Victoria.

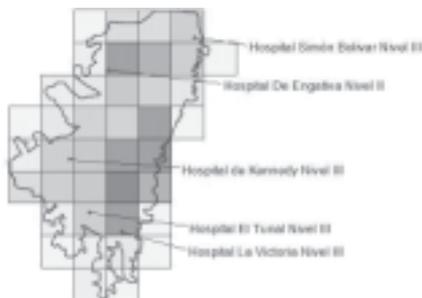
Para reducir el número de restricciones se agruparon 4 rectángulos de la Figura en uno solo, además se eliminó las zonas sin demanda. Con la información de demanda por zona fue ejecutado el programa lineal encontrando el cubrimiento de cada base teniendo en cuenta el criterio de mínima distancia, ver Figura 4.

**Figura 3.** Muestra representativa de la demanda georeferenciada en el casco urbano de Bogotá D. C., distancias y cuadrícula.



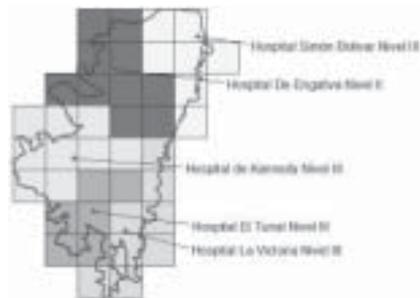
Los porcentajes de demanda en cada zona son: Simón Bolívar 15%, Kennedy 22%, La Victoria 18%, El Tunal 20%, Engativá 25%. De modo similar la asignación de ambulancias se desarrolló empleando el modelo TEAM (Tandem Equipment Allocation Model) presentado por Shilling en 1979, con los siguientes resultados: Simón Bolívar 5%, Kennedy 8%, La Victoria 4%, El Tunal 4%, Engativá 9%.

**Figura 4 a.** Frecuencia demanda



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 4 b.** Zonas determinadas por el modelo de programación lineal



Fuente: Elaboración Propia

## MODELAMIENTO DE COMPORTAMIENTOS DE FRECUENCIAS DE ARRIBO Y TIEMPOS DEL SISTEMA

**Tiempo entre llamadas.** Del periodo seleccionado como crítico, conformado por 74 días (11008 atenciones), fue analizado el tiempo en minutos entre llamadas para cada día. Se realizaron las pruebas de independencia para las observaciones diarias arrojando 71 días con muestras independientes. Con las observaciones independientes se realizó la prueba de homogeneidad Kruskal Wallis obteniendo un p-valor de 0.99944 por lo que se concluye que en las muestras independientes analizadas no hay diferencia estadística significativa en las medias proveniente de poblaciones con distribuciones idénticas.

A las observaciones anteriores se les realizó una prueba de bondad de ajuste para distribuciones discretas y su resultado fue rechazado; quiere decir que los datos no se comportan como una distribución de probabilidad conocida y es necesario realizar una empírica. El 90% de las llamadas realizadas al CRU entran en tiempos entre 0 minutos a 22 minutos.

**Tiempo de arribo al sitio del evento médico.** Se observa un pico las horas de la mañana a partir de las 9 AM disminuyendo en las horas de la tarde, además se puede ver que hay una mayor impacto en el tiempo de arribo en las horas pico de la mañana que en las de la tarde y que las horas de mayor oportunidad en el servicio están en la madrugada.

Se creó una distribución empírica para el tiempo de arribo en los intervalos de 9:00 a 17:59 y 18:00 a 8:59. Los valores esperados de las distribuciones para el arribo de una ambulancia al sitio del evento médico son de 17.5746519 minutos entre las 9:00 y 17:59 y de 14.9180528 minutos entre las 18:00 y 8:59.

**Tiempo de Atención.** El tiempo de atención depende del procedimiento médico que requiere el paciente. En el sector prehospitalario algunos grupos de investigación se han dedicado a la creación de protocolos médicos con propósitos diferentes; uno de ellos establecer el tiempo aproximado de intervención médica. En la Tabla 1 está la clasificación dada por el CRU a las solicitudes de atenciones prehospitalarias primarias y su respectivo porcentaje de participación y tiempo promedio de atención.

Similar al tratamiento de los datos del tiempo de arribo al sitio del evento médico, inicialmente las observaciones fueron tomadas de 0:00 a 23:59 y a estas se les aplicó la prueba de independencia y posteriormente a las aprobadas las de homogeneidad. Debido a la cantidad

de muestras dependientes y el rechazo de la prueba de homogeneidad a las restantes, fueron divididas las observaciones en el intervalo de mañana de 0:00 a 11:59 y tarde de 12:00 a 23:59.

Distribución empírica del tiempo de atención en la mañana (0:00 a 11:59) La distribución tiene un valor esperado de 28.7211102 minutos para la atención médica de cada paciente entre las horas de 0:00 a 11:59. Distribución empírica del tiempo de atención en la tarde (12:00 a 23:59).

El valor esperado de la distribución empírica es de 30.5382 minutos para la atención de pacientes en las horas de 12:00 a 23:59.

**Tabla N°1: Tipos de urgencias y porcentaje de participación**

Tipo De Emergencia	Porcentaje	Tiempo de atención
Accidente casero	7.2%	26.6795367
Accidente de trabajo	2.2%	23.9925926
Accidente de tránsito	26.6%	21.1794511
Accidente en vía pública	8.0%	22.9531915
Enfermedad común	49.9%	28.741918
Trauma por violencia	6.1%	26.8710602

Fuente: Elaboración Propia.

**Tiempo de arribo a la IPS.** Una vez el equipo médico estabiliza el estado de salud del paciente, el médico y el coordinador médico de turno definen el traslado a la IPS de acuerdo al tratamiento requerido por el paciente, la distancia del hospital y al plan de salud. El tiempo que tarda la ambulancia en llegar al hospital depende principalmente del estado del paciente y la ubicación de la IPS. En la ~~¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.~~ se muestra el comportamiento del tiempo de arribo según la hora del día.

Fueron agrupadas las observaciones del tiempo de arribo a hospitales por días y se les realizó las pruebas de independencia de la cual pasaron 67 de 74 muestras y a las muestras independientes se realizó la prueba de homogeneidad.

La bondad de ajuste fue realizada a las observaciones dando como resultado el rechazo de las pruebas. Entonces se realizó una distribución empírica. El valor esperado de la distribución empírica es de 20.36 minutos para trasladar a un paciente desde el sitio del evento médico hasta el hospital.

**Demora en el hospital.** Cuando la ambulancia realiza un traslado dentro del proceso de APH primaria, el equipo médico tiene como responsabilidad mantener el estado de salud del paciente y llevarlo oportunamente al centro de salud más indicado para su posterior tratamiento. Una vez en el hospital el médico de la ambulancia y el coordinador de la sala de urgencias realizan la entrega del paciente y de su historia clínica. Sin embargo en las IPS de Bogotá ocurren situaciones anormales como sobre cupo de emergencias en las salas y la falta de camillas en las salas de observación o de personal para recibir al paciente; haciendo que la demora dentro del centro de salud sea mayor de lo esperado afectando la ejecución normal del proceso de APH.

Se tomaron las observaciones de los tiempos de espera de la ambulancia en el hospital y se les realizaron las pruebas de independencia y a las muestras independientes se realizó el

análisis de homogeneidad. En total fueron 11 muestras de las 74 que no pasaron la independencia estadística.

A las muestras independientes y homogéneas se les realizó la bondad de ajuste en el programa stat:fit, el resultado de “autofit” arrojó que los datos se comportan como una distribución Log-Logistic(-12.1, 3.01,68.1) con una aceptación de 100, sin embargo, en la opción “goodness of fit” se observa que la muestra no cumplió con la prueba de Chi-cuadrado, por esta razón se decidió realizar una distribución empírica del tiempo de espera de ambulancias en los hospitales. El valor esperado de la distribución empírica es de 70.43767313 minutos de espera de la ambulancia en el hospital.

**Simulación del proceso de APH primaria.** La simulación fue realizada en el programa ProModel Student Versión v. 4. El software Promodel tiene dos herramientas: Stat:Fit y SimRunner. La herramienta Stat:Fit™ software para ajustar datos a distribuciones de probabilidad; y SimRunner toma un modelo construido y permite correr escenarios para investigar los resultados de los cambios al sistema.

## DESARROLLO DEL MODELO SIMULADO

Para representar en el software ProModel el sistema de APH primaria fue necesario crear Locaciones, Entidades, Rutas, Recursos, Procesos, frecuencia de arribos y distribuciones empíricas.

**Locaciones.** Las locaciones representan los lugares fijos en el sistema a dónde se dirigen los pacientes. En el caso del proyecto son el CRU, el lugar de accidente por zona, la atención por zona y los hospitales tomados como bases por cada zona.

La locación “CRU” es donde se identifica la ubicación del accidente, por medio de proporciones ingresadas a la programación del software. ProModel asigna a cada locación denominada como “zona de atención...”, una cantidad de solicitudes. Las locaciones denominadas “accidente...”, son representaciones simbólicas del lugar de accidente. A esta locación llegan las ambulancias con un tiempo de arribo programado en la herramienta de ruta o “path network” del programa ProModel y llevan a los heridos según la programación definida en el software ProModel. En ella se tuvo en cuenta las proporciones y el tiempo requerido para la cancelación del servicio; definiéndose que las solicitudes de servicio pueden ser canceladas con un tiempo promedio de 15 minutos o de 54 minutos, atendidas en el sitio del evento urgente o trasladadas a los hospitales; las solicitudes canceladas salen del sistema con el destino EXIT, las solicitudes atendidas en el sitio del evento urgente salen para una locación simbólica denominada “Exit Atenciones” y las atenciones trasladadas hacia el la locación que representa el hospital. La capacidad de cada locación “accidente” esta representa por el número máximo de ambulancias en cada zona, así la cola se genera en las instalaciones “CRU” y “Espera CRU”.

La locación “Exit Atención” representa de una forma simbólica la atención del paciente en el sitio del evento urgente. El tiempo de atención está definido por la herramienta ruta o “path networks” así asegurando el uso del recurso Ambulancia mientras atienden al paciente. De aquí las atenciones salen del sistema con el destino EXIT.

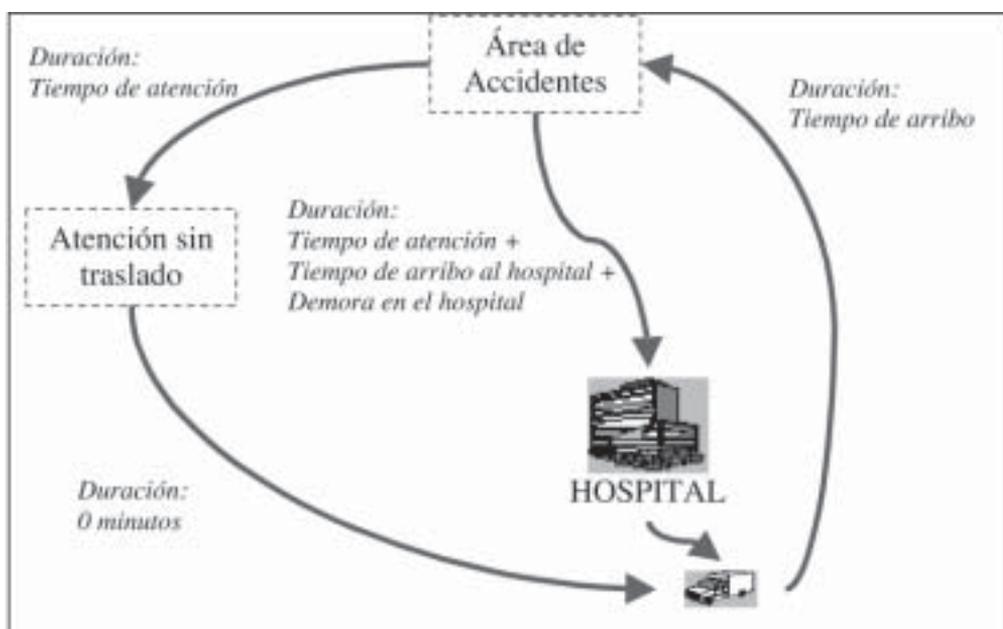
Las locaciones “Hospital...” son aquellas que reciben a los pacientes y es el punto de inicio de salida de las rutas o “path network” que sirven a las ambulancias para realizar el recorrido. Los pacientes provienen de las locaciones “atención...” relacionándosele el tiempo

de arribo al hospital según la distribución empírica calculada. Una vez llega la ambulancia con el paciente se produce una demora en el hospital según la distribución empírica calculada, luego de este tiempo el paciente sale con el destino EXIT. Las locaciones que representan los hospitales tienen una capacidad infinita.

**Entidades.** Se refiere en este caso a los pacientes que requieren de APH primaria, que son procesados por el sistema. Para la simulación en ProModel se creó una entidad denominada paciente. Inicialmente empieza como una llamada que entra por la locación “espera CRU” y una vez es asignada en la locación “CRU” a la locación “accidente...” la programación en el software por medio del comando GRAPHIC (), transforma la imagen. Según la programación, basada en el estudio de los comportamientos del proceso de APH del CRU, las entidades son distribuidas a diferentes zonas aplicándose los estados de solicitudes canceladas, solicitudes atendidas y pacientes trasladados.

**Rutas.** Las rutas son creadas en ProModel con la opción Path Networks. Son 5 rutas según la base, en general la ruta comienza en la ubicación de la ambulancia cuando esta disponible hacia el área de atención con una duración según la distribución empírica del tiempo de arribo. Del área de atención salen dos rutas, la primera hacia la locación “Exit Atenciones” que representa la atención sin traslado cuya duración es la distribución empírica de atención. y de este hacia un nodo que representa la ubicación de la ambulancia una vez disponible. La segunda es de la locación de atención hacia la locación que representa el hospital con una duración igual a la suma de las distribuciones de tiempo de atención, tiempo de arribo al hospital y demora en el hospital, del hospital sale a un nodo que representa la ubicación de la ambulancia cuando está disponible. Véase Figura 4.

**Figura 4:** Rutas del proceso de APH en ProModel.



Fuente: Elaboración Propia.

Imágenes: PROMODEL. Archivo de gráficos de Promodel Trauma3.glb

Las rutas diseñadas para representar el proceso de APH primaria son unidireccionales de tipo passing y definidas en unidades de tiempo. En la ventana PATHS se observa la dirección de la ruta y el tiempo empleado en el recorrido; en el campo TIME están las distribuciones de probabilidad empíricas de la sección 0 de modelación del sistema.

El campo interfaces en los Path Networks sirve para relacionar las rutas con las diferentes locaciones donde están las entidades. Para el caso de la simulación del proceso de atención primaria, la primera interfase esta relacionada con la locación que representa el parqueadero del hospital, la segunda con la locación que representa el lugar del accidente, la tercera con la locación que representa la atención en casa y la cuarta con la locación del hospital.

**Recursos.** Un recurso son las ambulancias que transportan los pacientes. En el presente trabajo se crearon 5 tipos de recursos, ambulancias pertenecientes a cada base. Cada recurso se moviliza por una ruta definida en Path Network. No se tuvo en cuenta paradas por mantenimiento preventivo o correctivo, tiempo muerto u otra situación que implica tiempo ocioso dentro del turno de la ambulancia.

**Proceso.** Una vez definidas las locaciones, entidades, recursos y path networks fue diseñado el proceso en ProModel. En la opción proceso se introdujo las proporciones de demanda según la zona y la proporción de solicitudes canceladas, atendidas y trasladadas, también se determinan los comandos que servirán para que el recurso tome, movilice y libere a las entidades, en nuestro caso ambulancias y pacientes respectivamente.

**Proceso de APH en el software ProModel.** El proceso de APH fue ejecutado de la siguiente forma: La entidad (paciente) entra por la locación "Espera CRU" y sale para la locación "CRU". Este paso se realiza en ProModel abriendo la ventana PROCESS y asignado la entidad paciente en el campo ENTITY y la locación "Espera CRU" en el campo LOCATION. Cuando se ejecuta PROCESS se despliega la ventana ROUTING que servirá para determinar el tipo de entidad que sale de la locación, el destino, la regla de servicio y la programación para su movimiento. De la locación "Espera CRU" sale la entidad paciente hacia la locación "CRU".

Cuando el paciente se encuentra en la locación "CRU" se determina la zona donde ocurrió el accidente. Esto se hace en ProModel utilizando la ventana ROUTING, introduciendo el nombre de la entidad, el destino y su respectiva proporción (probabilidad de ocurrencia). se observa como la venta PROCESS define que la entidad "paciente" se encuentra en la locación "CRU" y la venta ROUTING envía esta entidad "paciente" a cinco destinos diferentes con una probabilidad definida en el campo RULE.

Suponiendo que la entidad "paciente" fue enviada a la locación "atención\_simon\_bolivar", entonces la programación de software cambia la gráfica asignada a la entidad por medio del comando GRAPHIC (). En esta locación la solicitud de servicio puede ser cancelada, atendida en el sitio del evento médico o trasladado a un hospital; para esta actividad se tuvo en cuenta la proporción de atenciones canceladas y atendidas. En este paso se programó para que la ambulancia recogiera el paciente y lo trasladara al hospital. Para el caso de atenciones médicas en el sitio del evento urgente, se creó una locación "Exit Atención" donde la ambulancia lleva al paciente con un tiempo definido por la distribución de probabilidad de atención médica. El movimiento de las entidades "paciente" con los recursos "ambulancia" se realiza ejecutando el comando MOVE WHIT ().

Cuando el paciente se encuentra en la locación "hospital" y "exit atenciones" se utiliza el comando EXIT en el campo de destinación.

**Arribos.** Al transcurrir la simulación nuevas entidades entran al sistema, esto es un arribo. Un arribo puede consistir en personas, materia prima, información, los sistemas necesitan una entrada para activar el funcionamiento de los procesos al interior de ellos. Se utiliza la función ARRIVALS para definir la entidad, la locación donde llegan las entidades, la cantidad de entidades por llegada, los periodos de tiempo en que llegan, la ocurrencia de llegada, la frecuencia con que llegan las entidades y la programación.

Para el proceso de APH las llamadas llegan a la locación “Espera CRU”. La frecuencia de llegadas por comportarse como una distribución empírica debe ser introducida en ProModel por medio de USER DISTRIBUTIONS y luego debe ser buscada utilizando la ventana Logic Builder.

**Distribuciones empíricas.** ProModel tiene la opción de introducir los datos de las distribuciones empíricas utilizando la opción User Distributions, en la tabla de edición se puede definir el nombre de la distribución, el tipo (discreta o continua) y si es acumulativa. En el trabajo de grado fue necesario introducir por este medio los comportamientos de frecuencia de llamadas, tiempo de arribo, tiempo de atención, tiempo de arribo al hospital y espera en el hospital. Una vez abierta la opción USER DISTRIBUTIONS es desplegada la tabla TABLE FOR donde se ingresan la probabilidad y el valor.

**Corrida del modelo.** Teniendo en cuenta que las distribuciones empíricas encontradas del tiempo de arribo y atención no son iguales durante el día, entonces se realizaron corridas para los rangos de 00:00 a 8:59, 9:00 a 11:59, 12:00 a 17:59 y 18:00 a 23:59. La Tabla 2 muestra el número de horas necesarias en cada intervalo para simular 1, 2 y 3 meses.

### Validación del modelo

Su propósito según Banks (2001) es: Producir un modelo que represente el comportamiento del sistema real e Incrementar el nivel de credibilidad del modelo.

La validación se realizó con método de inspección, utilizando las siguientes medidas de desempeño:

- Tiempo promedio de permanencia del usuario en el sistema. Es el tiempo que transcurre desde la recepción de la llamada en el Call Center del CRU, hasta terminar la atención médica del paciente en el sitio del evento o la entrega del paciente en un hospital para el caso de traslado. También puede decirse que es el tiempo de espera para que la última llegada de la cola abandone el sistema una vez que se le haya proporcionado el servicio.
- Número promedio de pacientes atendidos del sistema por hora. Los pacientes atendidos del sistema se definen como la suma de pacientes atendidos en el sitio del evento y trasladados al hospital durante 1 hora.

**Tabla 2:** Número de horas de corridas por meses.

	Para 1 mes	Para 2 meses	Para 3 meses
00:00 a 8:59	270	540	810
9:00 a 11:59	90	180	270
12:00 a 17:	150	300	450
18:00 a 23:59	210	420	630

Fuente: Elaboración Propia.

### 3. RESULTADOS

En este caso las variables de entrada son la frecuencia de llamadas, el tiempo de arribo, el tiempo de atención, el tiempo hacia el hospital y espera en el hospital, todas éstas bajo una distribución de probabilidad calculada, ellas generan variables de salida como tiempo del usuario en el sistema, ocupación de ambulancias, pacientes atendidos y tiempos promedio de atención y arribo.

Antes de empezar el análisis de los datos se debe tener en cuenta el objetivo del estudio y el tipo de sistema que se plantea. Con el objetivo de estudio seleccionaremos las medidas de desempeño relevantes, mientras con el tipo de sistema se determina el procedimiento para encontrar el promedio y el intervalo de confianza de las medidas de desempeño seleccionadas (Centeno, 1998).

Se puede clasificar al sistema de APH en Bogotá D. C., como un sistema no terminal porque funciona las 24 horas del día y en condiciones normales nunca se detiene. Del tipo de sistema dependerá el diseño y análisis del experimento de la simulación (Law & Kelton, 2000).

La característica de los sistemas no terminales es que la corrida de simulación comienza en el tiempo=0 y se realiza durante un largo periodo de tiempo. Sin embargo, surge un inconveniente en éste sistema al definir las condiciones iniciales de la corrida de simulación en el tiempo=0. En el tiempo=0 el modelo comienza vacío y disponible, condiciones que no corresponden al comportamiento real.

Periodo De Calentamiento. Con el propósito de disminuir el efecto del periodo inicial transitorio, se aplicó una técnica de tiempo de calentamiento, empleando el método de Welch.

#### **Estimación de la media y del intervalo de confianza para las medidas de desempeño.**

Se definieron como medidas de desempeño: Tiempo de permanencia del usuario en el sistema, Número de pacientes atendidos por hora y Tiempo de reacción.

Se realizará la estimación de la media y el intervalo de confianza al 95%, de cada una de las medidas de desempeño, utilizando el concepto de periodo de calentamiento con el método de Welch y el de estado estable con el procedimiento de medias de lotes. Hay que recordar que de acuerdo a las distribuciones de probabilidad encontradas la simulación se realiza para cuatro rangos de horas, 0:00 a 8:59, 9:00 a 11:59, 12:00 a 17:59 y 18:00 a 23:59.

**Tiempo de permanencia del usuario en el sistema.** Esta variable de salida es la más importante y la de mayor relación con el objetivo del estudio. La validación se realizó para varios rangos de hora y para diferente número de ambulancias según la disponibilidad de información.

Los pasos de la validación fueron calcular el periodo de calentamiento, luego realizar el procedimiento de "media de lotes" y por último contrastar los valores del sistema real con el modelo utilizando la prueba de hipótesis de diferencia de medias. Se probó que es válido para representar el sistema real con un número de ambulancias entre 26 a 22.

**Número de pacientes atendidos por hora.** El propósito de esta medida de desempeño es medir el total de pacientes que recibieron atención médica y los que fueron trasladados al hospital, teniendo en cuenta que hay cancelaciones del servicio en cualquier momento de la operación.

El resultado de contrastar el modelo con el sistema real por medio de la hipótesis de medias, mostró que el modelo es válido para los horarios de 0:00 a 8:59, 9:00 a 11:59, 12:00 a 17:59 y 18:00 a 23:59.

## **DISCUSIÓN**

### **METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA UBICACIÓN DE AMBULANCIAS DEL SECTOR DE APH EN BOGOTÁ D. C.**

La siguiente metodología soporta la toma de decisiones sobre la ubicación y número de ambulancias requeridas por horas y zonas, que minimiza el tiempo y costo en APH. Los pasos de la metodología son:

- Conocer el proceso de APH.
  - Identificar el medio de almacenamiento de la información histórica de las APHs.
  - Identificar los periodos de mayor demanda.
- Una propuesta para hallar los periodos de alta demanda o críticos es la siguiente.
- \* Determinar el periodo a analizar; mes, trimestre, semestre, bimestre, semana, fines de semana, día, hora.
  - \* Una vez seleccionado el periodo, se escoge el periodo de mayor demanda y se comparara con los restantes por medio de la prueba de hipótesis estadística de diferencia de medias, con la siguiente hipótesis  $H_0$ : La media del mes de mayor demanda es igual a la media del mes X con un % de confiabilidad.
  - \* Si es aprobada la hipótesis nula quiere decir que estadísticamente no hay diferencia entre las medias de los periodos.
- Determinar la demanda en el área de cobertura del servicio.
  - Establecer bases, áreas de cobertura de las bases y número de ambulancias.  
La organización establece el número y ubicación de las bases de acuerdo a su capacidad económica y administrativa. Esta decisión se puede apoyar por medio de modelos de programación lineal que determinan la ubicación de bases nuevas o a partir de las bases existentes crear otras, Prawda explica varios modelos de localización que tienen en cuenta distancias o cobertura de la demanda.
  - Encontrar las distribuciones de probabilidad para la frecuencia de llamadas, tiempo de arribo, tiempo de atención, tiempo de traslado.
  - Elaboración del modelo simulado.
  - Validación del modelo simulado.
  - Propuesta de distribución de ambulancias y comparación del sistema alternativo.

## 4. CONCLUSIONES

La propuesta presentada mejoró la medida de desempeño de tiempo de permanencia del paciente en el sistema en un intervalo de confianza del 95%. Por ejemplo, entre las 0:00 a 8:00 con 18 ambulancias se reduce el tiempo de la medida de desempeño con un 95% de confianza entre 14.9 a 17.4 minutos.

Con la simulación se verificó que el uso de la programación lineal mejoró las medidas de desempeño del sistema.

El uso del software ArcView facilitó la georeferenciación del sitio del evento médico y de los hospitales, la medición de distancias, y el cálculo de la densidad de demanda por zonas.

Es posible tener en cuenta factores como desplazamientos, tiempos de actividades, cancelación del servicio y demoras a través de la calibración de los modelos de simulación.

La utilización de los modelos lineales de máxima cobertura y mínima distancia utilizados en la metodología para determinar las zonas y capacidad instalada, generan un escenario que evaluado por simulación, mejora las medidas de desempeño del sistema.

Se encontró que el promedio del tiempo de desplazamiento cambia según la hora del día debido a las horas pico de congestión vehicular. En el día (9:00 a 17:59) hay un promedio en el tiempo de desplazamiento de 17.57 minutos y en la noche-madrugada (18:00 a 8:59) baja a 14.91 minutos.

## 5. REFERENCIAS

- [1]. ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. Decreto 053 De 2002 (Febrero 15): Por el cual se crea el Comité para la implementación del Número único de Emergencias y Seguridad del Distrito Capital.
- [2]. ARROYO, José Manuel y GONZÁLEZ GAMBOA, Carlos Hernando. Tutorial Para El Modelado De Sistemas De Manufactura Con Promodel. [En Línea]. Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia. BOGOTÁ, 2004. Disponible en Internet: <http://www.unal.edu.co/salacam/tutorialpromodel/index.htm>
- [3]. BANKS, Jerry y otros. Discrete- Event System Simulation. 3 ed. Unites States of America: Prentice Hall, 2001. 594 p. ISBN: 0-13-088702.
- [4]. BAZARAA. Programación Lineal y Flujo de Redes. México: Limusa, 1980. 1p.
- [5]. CANAVOS, George. C. Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y Métodos. Editorial McGraw-Hill. México. 1988
- [6]. CASTILLO, Ignacio and INGOLFSSON, Armann. Thaddeus Socially Optimal Location of Facilities with Fixed Servers: Stochastic Demand and Congestion. Department of Finance and Management Science. University of Alberta School of Business. En: World Wide Web. Alberta, Canadá: Julio 2002.

- [7]. CENTENO, Martha y REYES, Florencia. So You Have Your Model: What To Do Next A Tutorial On Simulation Output Analysis. En: Proceedings of the 1998 Winter Simulation. Vol. 1. Miami: (12/13/1998 – 12/16/1998); p. 23 – 29. ISBN: 0-7803-5133-9.
- [8]. CENTRO REGULADOR DE URGENCIAS (Bogotá). Boletín informativo. [En línea]. GONZÁLEZ, Miguel. 16 de diciembre de 2005, vol.1. Bogotá. SECRETARÍA DISTRITAL DE SALUD DE BOGOTÁ, D.C. Diciembre de 2005. [Citado en: 31 octubre de 2006]. Nota: documento en formato \*.doc. Disponible en Internet: [http://www.saludcapital.gov.co/secsalud/lineas/linea125/BOLETIN\\_CRU\\_Vol\\_01\\_No1\\_2005.doc](http://www.saludcapital.gov.co/secsalud/lineas/linea125/BOLETIN_CRU_Vol_01_No1_2005.doc)
- [9]. \_\_\_\_\_ Línea 125. [En Línea]. Administrador Web: Md. Vargas, Luís Eduardo. SECRETARÍA DISTRITAL DE SALUD DE BOGOTÁ, D.C. [citado en: 31 octubre de 2006]. Disponible en Internet: <http://www.saludcapital.gov.co/secsalud/lineas/linea125/linea.htm>
- [10]. \_\_\_\_\_ Sitio Web del CRU (Bogotá). [En línea]. Administrador del Web: Luís Eduardo Vargas. Miércoles, 06 de junio de 2001. Bogotá. SECRETARÍA DISTRITAL DE SALUD DE BOGOTÁ, D.C. [citado en: 20 octubre de 2006]. Disponible en Internet: <http://orbita.starmedia.com/~centroregulador/index.htm>
- [11]. CÓRDOBA BARAHONA, Germán. Simulación Discreta. Facultad de Ingeniería Industrial. Universidad de Santiago de Cali. Cali: Julio 2000. 8-20 p.
- [12]. CRAINIC, Teodor; GENDREAU, Michel y POTVIN, Jean-Yves. Parallel Tabu Search. En: Parallel Metaheuristics, John Wiley & Sons Hoboken. (2005); p. 298-313.
- [13]. DE OLIVEIRA, Leise Kelli. Uma Aplicação do Modelo Hiper cubo de Filas Para Avaliação do Centro de Emergência da Polícia Militar de Santa Catarina. Florianópolis, 2003. Trabajo de grado (Maestría de Ingeniería de Producción). Universidad Federal de Santa Catarina. Programa de postgrado en Ingeniería de Producción., Pág. 7.
- [14]. DESTRI JUNIOR Jorge. SISTEMA DE APOIO À DECISÃO ESPACIAL APLICADO AO SERVIÇO DE ATENDIMENTO MÓVEL DE URGÊNCIA EM VIAS DE TRÂNSITO. Proyecto para optar el título de Doctor en Ingeniería Industrial. Florianópolis 2005.
- [15]. DIJK, N.M. van et al. Simulation and OR (Operations Research) in Combination for Practical Optimization. En: Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, (4-7, Diciembre, 2005); p 274-284. ISBN: 0-7803-9519-0.
- [16]. DUSKO, Kalenatic y LÓPEZ, César Amilkar. Técnicas de simulación en producción. Facultad de Ingeniería de Sistemas. Bogotá: Sistema de Investigaciones Universidad Católica de Colombia. 1995. 2 - 30 p.
- [17]. FISHWICK, Paul. Simulation Model Design and Execution: Building Digital Worlds. Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey. 1995. 448p. ISBN:0-13-098609-7
- [18]. GENDREAU, Michel; LAPORTE, Gilbert y SEMET, Frédéric. A Dynamic Model and Parallel Tabu Search Heuristic for Real-Time Ambulance Relocation. En: Parallel Computing. No.27. (2001); p.1641-1653.
- [19]. HAKIMI, S.L. "Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph". En: Operations Research, Vol.12 (1964). p. 450-459.

- [20]. HENDERSON, Shane y MASON, Andrew. Ambulance service planning: simulation and data visualization. En: International Series in Operations Research & Management Science: Operations Research and Health Care. Vol.70. (Miércoles, 05 de abril, 2006); p.77-102. ISBN: 978-1-4020-7629-9 (Impreso) 978-1-4020-8066-1 (Online).
- [21]. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Citas y notas de pie de página. Bogotá: ICONTEC, 1995-06-31. 7p. (NTC 1487).
- [22]. \_\_\_\_\_ Documentación. Guía para la Numeración de divisiones y subdivisiones en documentos escritos. Bogotá: ICONTEC, 2001-12-18. 4p. (NTC 1075).
- [23]. \_\_\_\_\_ Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Bogotá: ICONTEC, 2002-03-11. 34p. (NTC 1486).
- [24]. \_\_\_\_\_ Documentación. Referencias bibliográficas para libros, folletos e informes. Bogotá: ICONTEC, 1996-04-24. 15p. (NTC 1160).
- [25]. \_\_\_\_\_ Documentación. Referencias bibliográficas para publicaciones seriadas. Bogotá: ICONTEC, 1996-04-24. 15p. (NTC 1308).
- [26]. \_\_\_\_\_ Documentación. Referencias bibliográficas para normas. Bogotá: ICONTEC, 1996-04-24. 15p. (NTC 1307).
- [27]. \_\_\_\_\_ Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. Bogotá: ICONTEC, 1996-04-24. 15p. (NTC 4490).
- [28]. INSTITUTO NACIONAL DE SALUD SUBDIRECCIÓN DE EPIDEMIOLOGÍA Y LABORATORIO NACIONAL DE REFERENCIA. Boletín epidemiológico semanal - Semana Epidemiológica No. 48 noviembre 23 a 29 de 2003. 8p. Disponible en Internet: [http://www.col.ops-oms.org/sivigila/2003/BOLE48\\_03.pdf](http://www.col.ops-oms.org/sivigila/2003/BOLE48_03.pdf)
- [29]. JARAMILLO LONDOÑO, Maria Eugenia. Protocolos De Atención Médica Prehospitalaria: Resultados Del Trabajo De Investigación Interinstitucional. Instituto de Ciencias de la Salud CES-CEMPAS, 2002.
- [30]. JIA, Hongzhong; ORDONEZ, Fernando y DESSOUKY, Maged. A Modeling Framework for Facility Location of Medical Services for Large-Scale Emergencies. Daniel J. Epstein Department of Industrial and Systems Engineering University of Southern California. Los Ángeles: (Septiembre 15 de 2005). 30 p.
- [31]. LAW, Averill M. y KELTON, W. David. Simulation Modeling and Analysis. 3 Ed. Singapur: Mc Graw Hill, 2000. 760 p. ISBN: 0-07-059292-6.
- [32]. LORENA, Luiz Antonio Nogueira y FURTADO, João Carlos. Constructive Genetic Algorithm for Clustering Problems. En: Evolutionary Computation. Vol.9. No.3. (13, marzo, 2006); p. 309 – 327.
- [33]. LOSCH, August. Economics of Location. En: Science Edition Paperback. New York: (1967); p. 520
- [34]. MAJAN, Prasad S. y INGALLS Ricki G. Evaluation of Methods Used To Detect Warm-Up Period in Steady State Simulation. En: Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference Vol1. Piscataway, New Jersey: 5-8 Diciembre 2004. 663-671 p.

- [35]. MÉNDEZ ÁLVAREZ, Carlos Eduardo y MORENO ÁNGEL, Luís Guillermo. GUÍA PARA ELABORAR DISEÑOS DE INVESTIGACIÓN (Aplicado a Proyectos y Trabajos de Grado en Administración y Economía). Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario, Facultad de Administración de Empresas. Bogotá, D. C: Marzo de 1982.
- [36]. MÉNDEZ GIRALDO, Germán y ÁLVAREZ POMAR, Lindsay. Diseño De Un Algoritmo Genético Para Un Sistema Logístico De Distribución. En: Ingeniería: Revista de Ingeniería de la Universidad Distrital. No. 1, 2000. p 20-27.
- [37]. MONTGOMERY, Douglas. Diseño y Análisis de Experimentos. Segunda Edición. México: Limusa Wiley, s.f. 686 p.
- [38]. O'KELLY, Morton E. y MURRAY Alan T. A lattice covering model for evaluating existing service facilities. Department of Geography, the Ohio State University, Columbus. Ohio, USA. 2002. p 568.
- [39]. PRAWDA WITENBERG, Juan. Métodos y Modelos de Investigación de Operaciones. México: Limusa Noriega Editores, 1999. Vol. 2, 1026 p.
- [40]. RÖOS INSUA, David; RÖOS INSUA, Sixto y MARTÓN JIMÉNEZ, Jacinto. Simulación: Métodos y Aplicaciones. Universidad Politécnica de Madrid: AlfaOmega S.A, 2000. 371 p.
- [41]. ROBINSON, Stewart. A Statistical Process Control Approach for Estimating the Warm-up Period. Proceeding of the 2002 Winter Simulation Conference. Piscataway, New Jersey: ed. E. Yucesan, C.-H. Chen, J.L. Snowden and J.M. Charnes. 439-446 p.
- [42]. RUBIANO, Andrés y PAZ, Alexander. APH "Fundamentos". Bogota-Colombia: Editorial Distribuna, 2003. 975 p. ISBN: 9583363545.
- [43]. SÁNCHEZ, Arsenio Celorrio. Muestreo y tamaño de muestra. Disponible en Internet: <http://www.monografias.com/trabajos12/muestam/muestam.shtml>
- [44]. SECRETARIA DISTRITAL DE SALUD DE BOGOTA. Requisitos de funcionamiento de Ambulancias. 2005. Bogotá. Notas: Documento en formato \*.doc. 3p. Disponible en Internet: [http://www.saludcapital.gov.co/secsalud/descargas/REQUISITOS\\_FUNCIONAMIENTO\\_DE\\_AMBULANCIAS.doc](http://www.saludcapital.gov.co/secsalud/descargas/REQUISITOS_FUNCIONAMIENTO_DE_AMBULANCIAS.doc)
- [45]. \_\_\_\_\_ Boletín ERA (Enfermedad Respiratoria Aguda): Vigilancia Epidemiológica Tipo Centinela De Los Virus Respiratorios En Niños Y Niñas Menores De 5 Años En El Distrito Capital Año 2005. [En Línea]. HÉCTOR ZAMBRANO - Secretario Distrital de Salud. 7 de febrero 2006. Bogotá. No 21. Disponible en Internet: [http://www.saludcapital.gov.co/secsalud/boletines\\_epidemiologicos/ERA/ERA%20\(PDF\)/BOLETIN%20ERA%20No%2021.pdf](http://www.saludcapital.gov.co/secsalud/boletines_epidemiologicos/ERA/ERA%20(PDF)/BOLETIN%20ERA%20No%2021.pdf). 12p.
- [46]. SILVA FIGUEIREDO, Ana Paula y NOGUEIRA LORENA, Luiz Antonio. Localização de Ambulâncias: Uma aplicação para a cidade de São José dos Campos – SP. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. En: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiânia, Brasil: (16-21 de Abril de 2005); p. 1965-1972.
- [47]. VILLARREAL, Daniel. Simulación y Optimización de Procesos Discretos y Continuos, Estado del Arte y Tendencias. En: World Wide Web, México.

