

New Fire Station Location through an Accident Attention Indicator in San Miguel district with mathematical optimization

Héctor Mattos Galarza, Ing. Wilmer Francisco Guadalupe Aguirre, Ing. Jonatán Edward Rojas Polo, Mg. Mónica Huayta Durand, Ing., Andrea Caballero Castillo, Carlos Trujillo Delgado

¹Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, hmattos@pucp.pe, wfguadalupea@pucp.pe, jrojas@pucp.pe, monica.huayta@pucp.pe, andrea.caballero@pucp.pe, carlos.trujillod@pucp.pe

Abstract -- Nowadays, deciding where to place different public service entities, as in the case of Firefighter Stations, has become more difficult because of the inefficiency of the existing methods: the location of the oldest Firefighter Stations has not been adapted to the current urban expansion and the most recent ones have only considered the influence of the frequency of the accidents. In that way, the objective of this article will be to explain and propose a methodology based on an Indicator of Accident Respond according to a restricted area and to the existing Firefighter Stations (further on, INDICADOR), the one that will allow to establish and evaluate potential terrains for the location of the new Firefighter Station. It is also important to notice that, in this particular case, the execution of the method will be limited to one sector of the district of San Miguel in Lima-Peru; however, it adapts to any sector to analyze.

For the execution of this methodology, E.W. Dijkstra's Algorithm, commonly known as The Shortest Route Algorithm, is going to be used in order to define the INDICADOR of each potential terrain which, finally, will determine the location for new Firefighter Station. In the same way, for this article were used programming and analysis software such as MatLab and Visual Studio Code.

Keywords – Stations location, simulator of attention times, firemen assistance time.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.443>
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

Localización de una nueva Estación de Bomberos mediante un Indicador de Atención de Accidentes en el sector de San Miguel y el uso de optimización matemática

Héctor Mattos Galarza, Ing. Wilmer Francisco Guadalupe Aguirre, Ing. Jonatán Edward Rojas Polo, Mg. Mónica Huayta Durand, Ing., Andrea Caballero Castillo, Carlos Trujillo Delgado
¹Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, hmattos@pucp.pe, wfguadalupea@pucp.pe, jrojas@pucp.pe, monica.huayta@pucp.pe, andrea.caballero@pucp.pe, carlos.trujillod@pucp.pe

Abstract— Nowadays, deciding where to place different public service entities, as in the case of Firefighter Stations, has become more difficult because of the inefficiency of the existing methods: the location of the oldest Firefighter Stations has not been adapted to the current urban expansion and the most recent ones have only considered the influence of the frequency of the accidents. In that way, the objective of this article will be to explain and propose a methodology based on an Indicator of Accident Respond according to a restricted area and to the existing Firefighter Stations (further on, INDICADOR), the one that will allow to establish and evaluate potential terrains for the location of the new Firefighter Station. It is also important to notice that, in this particular case, the execution of the method will be limited to one sector of the district of San Miguel in Lima-Peru; however, it adapts to any sector to analyze.

For the execution of this methodology, E.W. Dijkstra's Algorithm, commonly known as The Shortest Route Algorithm, is going to be used in order to define the INDICADOR of each potential terrain which, finally, will determine the location for new Firefighter Station. In the same way, for this article were used programming and analysis software such as MatLab and Visual Studio Code.

Keywords— Stations location, simulator of attention times, firemen assistance time.

Resumen— En la actualidad, la toma de decisiones para la localización de diversas entidades de servicios públicos, como el caso de las estaciones de bomberos, se dificulta cada vez más debido a la ineficiencia de los métodos existentes: la localización de las estaciones más antiguas no ha sido adaptada a la actual expansión urbana y las más recientes consideran como único factor influyente a la frecuencia de siniestros [1]. En tal sentido, el objetivo de este artículo será explicar y plantear una metodología basada en un Indicador de Atención de Accidentes de acuerdo al territorio escogido y a las estaciones de bomberos existentes (en adelante, INDICADOR), el cual permitirá establecer y evaluar las opciones de terrenos potenciales para la localización de una estación de bomberos. Cabe resaltar que, en este caso particular, la ejecución del método se limitará a un sector del distrito de San Miguel en Lima-Perú; no obstante, este se adapta a cualquier sector que se desee analizar.

Para la ejecución de dicha metodología, se aplicará el Algoritmo de E.W. Dijkstra, comúnmente conocido como el Algoritmo de la Ruta más Corta [2], para obtener el INDICADOR de cada uno de los

terrenos potenciales que, finalmente, determinará la localización de la nueva Estación de Bomberos. Asimismo, para la realización del presente trabajo se empleó software de programación y análisis tales como MatLab y Visual Studio Code.

Palabras clave— Localización de estaciones, Simulador de tiempos de atención, Tiempo de auxilio de bomberos.

I. INTRODUCCIÓN

La congestión vehicular en la ciudad de Lima es uno de los mayores problemas para la movilización de sus ciudadanos, de los cuales el 67,4% se encuentra insatisfecho con dicha problemática [3]. La causa principal es el constante incremento del parque automotor [4]; sin embargo, la deficiente infraestructura vial [5], en sus diversos distritos, genera cuellos de botella que agravan aún más el problema. Al respecto, las empresas e instituciones que se dedican a la asistencia ante situaciones de emergencia, tales como clínicas, hospitales y entidades públicas como el Cuerpo de Bomberos, se ven directamente afectadas por el retraso que esto genera al dirigirse hacia la zona del siniestro. Esto conlleva a incurrir en costos de transporte adicionales a las empresas e instituciones no lucrativas que prestan servicios de emergencia. Sin embargo, para ambas, el principal problema no radica en los costos asociados, sino en las repercusiones negativas que esto podría implicar, como la expansión de algún siniestro que pueda finalizar con la pérdida de las vidas de las personas involucradas. En base a ello, el presente trabajo se enfocará en las sedes del Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú (CGBVP).

El CGBVP es la institución dedicada a atender las emergencias médicas, por incendios, por fuga de gas licuado, de rescates, por derrame de productos peligrosos, por corto circuito, por accidentes vehiculares, entre otros que pudiesen suscitar en el país, siendo su objetivo principal es preservar la vida de las personas, y, en segundo plano, las propiedades públicas o privadas. El CGBVP está compuesto por personas que se integran voluntariamente a la institución dada su vocación de servicio, abnegación y disciplina, los cuales son los valores principales que cultivan en sus miembros [6].

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.443>

ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Industry, Innovation, And Infrastructure for Sustainable Cities and Communities", 24-26 July 2019, Jamaica.

Tabla I
Emergencias atendidas por el CGBVP (2014-2018)

Tipo de Emergencia	2014	2015	2016	2017	2018
Incendios	9430	9473	12648	12114	13690
Fuga de gas licuado	4728	5150	5763	6316	6245
Emergencias medicas	73180	69191	75081	65111	64139
Rescates	2634	3335	4057	4229	4538
Derrame de productos	62	87	139	109	120
Corto circuito	1703	2642	2623	3093	2776
Servicios especiales	5994	6902	8492	8504	8342
Accidents vehiculares	11239	11943	13418	13700	16177
Falsa alarma	2136	2258	3013	3549	3202
Otros	1600	1917	2090	2655	2455
Total	112706	112898	127324	119380	121684

Adicionalmente, cabe recalcar que la cantidad de emergencias que la institución ha logrado atender ha crecido a un ritmo interanual del 1.9% durante los últimos 5 años, siendo las más representativas las emergencias médicas, que representan un 58.5% del total. En cuanto al resto, resaltan los accidentes vehiculares (11.1%) y los incendios (9.6%), los cuales han aumentado a una tasa promedio de 9.8% y 9.5% en el mismo periodo, respectivamente. [7]

Se tiene conocimiento de pocos trabajos similares respecto al tema. Anna Ulander (2015) propuso un modelo de programación lineal para encontrar las ubicaciones ideales para una determinada cantidad de unidades de respuesta de diferentes características, es decir, diferentes combinaciones de vehículos y bomberos, e incluso diferentes tipos de accidentes. Dicho modelo pretende minimizar el tiempo de respuesta a los accidentes esperados en un área dada y a la vez asegurar que todos los recursos lleguen a la zona de la emergencia, priorizando la llegada de algunos de ellos. Dicho algoritmo ha sido probado en un escenario real, representando a la provincia de Östergötland en Suecia [8]. Por otro lado, Irfan Macit (2015) propuso un modelo de programación entera mixta, resuelto mediante el algoritmo genético binario modificado, para lograr el mismo fin que Ulander en la ciudad de Samsun, Turquía. Con este modelo busca obtener las localizaciones de estaciones para poder cubrir la mayor parte de la población con la mínima distancia recorrida, considerando que se tiene como política que la estación y la zona de servicio se encuentren a un máximo de 25 minutos de distancia. De igual forma, toma en cuenta la capacidad de cada estación, así como una limitante en el presupuesto [9].

Para obtener la óptima localización de la nueva estación de bomberos se utilizará la Teoría de Redes, metodología que permite esquematizar, mediante algoritmos, la resolución de diversos problemas de optimización. Para fines del presente estudio, se ha delimitado una zona de San Miguel, en la cual existen cinco (05) estaciones de bomberos aledañas. Dentro del territorio delimitado, se utilizarán las medidas de latitud y longitud de cada cruce entre calles y avenidas. Siguiendo el esquema de la Teoría de Redes, se definirá a todos los cruces de

calles y avenidas como nodos, y las uniones de nodos como arcos. Basándose en el Algoritmo de E.W. Dijkstra, se determinará la ruta más corta desde cada nodo a cada estación de acuerdo a la proximidad de los nodos a las cinco estaciones y, con esta información, se calculará el INDICADOR que será de utilidad para la decisión de localizar la nueva estación de bomberos. La estructura del artículo está organizada de la siguiente manera: el Estado del Arte se sitúa en la sección 2, la Descripción del Modelo es presentada en la sección 3, la Discusión de Resultados está ubicada en la sección 4 y, finalmente, las Conclusiones y Recomendaciones conforme a los objetivos planteados inicialmente se encuentran en la sección 5.

En síntesis, en el presente trabajo se pretende obtener un método que ayude a la toma de decisiones acerca de la localización de una estación de Bomberos, de tal forma que sea un lugar óptimo que posea la capacidad de atender la mayor cantidad de potenciales accidentes en el menor tiempo posible, es decir, por la ruta más corta.

II. ESTADO DEL ARTE

El objetivo del modelo planteado es optimizar la toma de decisiones sobre la localización de una Estación de Bomberos, considerando como variables relevantes al tiempo, la distancia recorrida y el costo. Por ello, se podría afirmar que los bomberos se desplazarán en un sistema que puede ser representado como una red, cuyos nodos son zonas a delimitar posteriormente, los cuales, los cuales estarán unidos entre sí mediante arcos o caminos. A continuación, se detallará el estado del arte y definiciones conceptuales de las principales herramientas que servirán de soporte a la presente investigación:

A. Teoría de redes

Modelo que ayuda a resolver situaciones que pueden ser configuradas como redes, es decir, nodos conectados por ramas. La notación para describirlas es (N, A) , donde N hace referencia al conjunto de nodos y A al conjunto de pares ordenados que pueden ser conectados [10]. En base a ello, los dos principales elementos de una red son los siguientes:

- **Nodos:** También conocidos como vértices o puntos, de los cuales se parte para llegar a otro.
- **Arcos:** Es el camino que une o conecta los nodos entre sí. El arco representa la dirección del movimiento que podría ocurrir entre vértices y tiene una notación de (i,j) que indica su origen y fin, respectivamente. Observe la figura 1 que muestra una red que contiene 7 nodos.

Existe una amplia variedad de algoritmos de optimización en base a dicha teoría, de los cuales los más conocidos son los relativos al cálculo de la ruta más corta, flujo máximo en un sistema, árbol de mínima expansión y transporte. Para el

presente trabajo, se consideró idóneo aplicar el primero de los mencionados bajo el planteamiento de E.W. Dijkstra (1959).

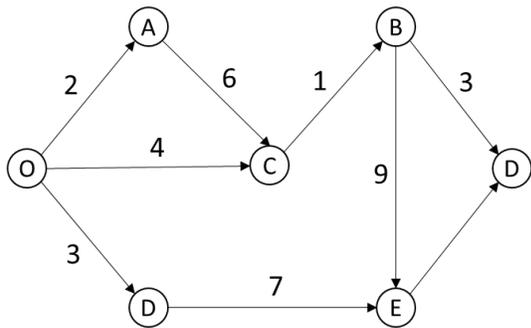


Fig. 1 Red de Siete Nodos

B. Algoritmo de Dijkstra

Ideado por el ingeniero alemán Edsger Wybe Dijkstra, quien lo publicó en 1959 en un artículo denominado “A note in Two Problems in Connexion with Graphs”. El algoritmo consiste en encontrar el camino más corto desde un nodo de origen a un nodo de destino. En tal sentido, la magnitud del arco puede definirse como costo, tiempo o distancia. Además, los coeficientes deben ser no negativos.

Con la finalidad de simplificar el acercamiento a dicho algoritmo, se recurrió al siguiente procedimiento heurístico planteado por Dieter Jungnickel (2004):

Sea (G, w) una red, donde G es un grafo y todas las longitudes $w(e)$ no son negativas. La lista de proximidad para un nodo v es denotada por A_v . La meta es calcular las distancias respecto a un nodo s .

Algoritmo 1. Método de Dijkstra para encontrar ruta más corta [2, 11].

- 1: *procedure DIJKSTRA* ($G, w, s; d$)
- 2: *for* $v \in V \setminus \{s\}$ *do* $d(v) < -\infty$ **od**;
- 3: *while* $T \neq \emptyset$ *do*
- 4: *find some* $u \in T$ *such that* $d(u)$ *is minimal*
- 5: $T < -T \setminus \{u\}$;
- 6: *for* $v \in T \cap A_u$ *do* $d(v) < -\min(d(v), d(u) + w_{uv})$ *od*
- 7: **od**

C. Distancias en Geometría Elíptica de 2 dimensiones

La distancia más corta entre dos puntos sobre la superficie de una esfera es determinada por el arco de la circunferencia dictada por su círculo mayor. Para calcular esta distancia, se utiliza la Ley de Haversine (Semiverseno) [12]. Sea $hav(x)$ el Haversine de x , se afirma que:

$$hav(x) = \sin^2(x/2)$$

Fórmula de la Ley de Haversine (Semiverseno) (1)

Dado un triángulo definido sobre la superficie de una esfera unitaria por tres puntos y sus distancias más cortas (véase la Figura 2):

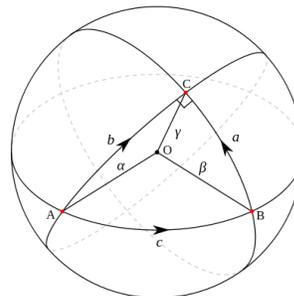


Fig. 2 Triángulo Geodésico en una Esfera. Fuente: Wikimedia Commons

De esta manera, el semiverseno de “C” es dado por:

$$hav(c) = hav(a - b) + \sin(a) \cdot \sin(b) \cdot hav(C)$$

Fórmula de la distancia en Geometría Elíptica (2)

D. Valor esperado para Variables Discretas y Continuas

Este término también es conocido como Esperanza matemática y corresponde al número $E[X]$ que proporciona una idea del valor medio de un fenómeno aleatorio.

De acuerdo a Hamdy A. Taha (2012), dicho valor representa la tendencia central de una variable aleatoria y puede ser calculado de la siguiente manera:

$$E_{(x)} = \sum_{x=a}^b x \cdot p(x), \quad x \text{ discreta}$$

Fórmula de la Esperanza de una Variable Discreta (3)

$$E_{(x)} = \int_a^b x \cdot f(x) dx, \quad x \text{ continua}$$

Fórmula de la Esperanza de una Variable Continua (4)

E. Algoritmo Quicksort

Es un algoritmo basado en la estrategia Arriba - Abajo, mejor conocida como divide y vencerás, que permite, en promedio, ordenar n elementos en un tiempo proporcional a $n \cdot \log(n)$. La secuencia de pasos requerida para emplearlo es la siguiente [13]:

- Se toma cualquier elemento de cualquier posición del arreglo. Este será nuestro elemento Pivote.
- Se trata de ubicar al Pivote en la posición correcta del arreglo, de tal forma que todos los elementos que se

encuentran a su izquierda sean menores o iguales al pivote y todos los elementos que se encuentren a su derecha sean mayores o iguales.

- Se replican los pasos anteriores para los conjuntos de datos que se encuentran a la izquierda y a la derecha de la posición correcta del pivote en el arreglo.

Una vez que los elementos menores al pivote quedan a su izquierda y los mayores a su derecha, el pivote queda exactamente en el lugar que ocupará dentro del arreglo ordenado. Finalmente, por cada recursión (o iteración según sea el caso), los pivotes de las sub-listas quedarán ordenados.

III. CASO DE ESTUDIO

En esta sección se detalla la metodología para la localización de las estaciones de bomberos.

A. Datos del método

En primera instancia, como se mencionó, el método se puede aplicar para una zona delimitada cualesquiera; no obstante, el presente trabajo se abocará sólo a un sector. Se realizará la descripción del método, delimitando un sector específico de estudio del distrito de San Miguel, tal como se observa en la figura 3.



Fig.3 Sector de San Miguel a Estudiar en el Modelo
Fuente: OpenStreetMap.com.

Para la toma de datos de los Nodos del sector delimitado para el estudio, se empleó la base de datos de la página web www.openstreetmap.com. La data de esta página es de código abierto, por ende, la descarga en general es simple y sin restricciones. En la figura 4 se muestra la data extraída.

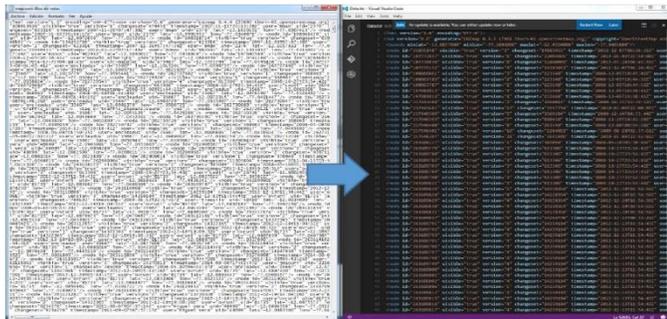


Fig.4 Data extraída de OpenStreetMap del Sector Delimitado de San Miguel

Para la extracción de los datos del archivo de Open Street Map, se empleó el software Visual Studio Code. El cual permitió obtener tres (03) características relevantes para la determinación de los Nodos y Arcos, los cuales son: Latitud, Longitud e ID. En el caso del atributo ID, es necesario resaltar que es un dato definido por la fuente de la misma página web y se define como la identificación de todas las intersecciones entre Calles, Avenidas, Cuadras dentro del sector delimitado; ergo, se define a los Nodos de la red como tales intercepciones. Asimismo, se define los Arcos de la red como las uniones entre los Nodos ya definidos. Cabe resaltar que los Arcos poseen sus propios ID, tal y como lo especifica la fuente, en tal sentido, las uniones de varios arcos componen una Calle o Avenida. En la figura 5 se detalla la extracción de la data.

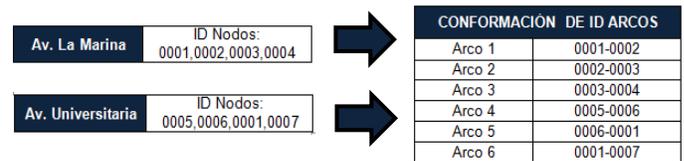


Fig.5 Formato de extracción de la data

Cada Calle y Avenida se componen por varios arcos y cada uno de estos arcos poseen un único ID, así como el ID del Nodo i y el ID del Nodo $i + 1$; de esta manera, si una calle contiene n nodos, se extraerán $n - 1$ arcos. En la tabla II se muestra un extracto de los datos extraídos y ordenados por atributos (Latitud, Longitud e ID) de los nodos y arcos usando el software Matlab.

Tabla II
Data Ordenada en Matlab

Nodo ID	Latitud	Longitud	Ruta ID	Nodo ID 1	Nodo ID 2
1570772227	-12.1078331	-77.0607917	1	107774940	107774941
3018898117	-12.107742	-77.0609596	2	2272057659	474873270
3018898116	-12.1073167	-77.061355	3	817654852	817654860
3018898115	-12.1064584	-77.0621301	4	817654860	1355562709
3018898114	-12.1050665	-77.0637355	5	819211188	819211141
3018898113	-12.1043628	-77.0644789	6	263112181	263121418
3018898112	-12.1030482	-77.065681	7	263121418	263121419
1425922084	-12.1026993	-77.0582382	8	263360041	263360133
3018898111	-12.1025379	-77.0664956	9	263122089	263121291
1425922012	-12.1013014	-77.0575141	10	263121291	263121088
1425921988	-12.1012231	-77.0574763	11	263121088	263114455
3018898110	-12.1008521	-77.0702996	12	263359439	263122087
3018898109	-12.0997308	-77.0719842	13	263121418	263121293
1425922099	-12.0980204	-77.0558173	14	2073408910	2854447005
3018898108	-12.0980064	-77.0739218	15	2854447005	2854447004
1425922069	-12.0979045	-77.0557677	16	2854447004	263359072
1570770462	-12.0971287	-77.0786638	17	263359072	263359071
...					

B. Determinación de los Nodos Estaciones

Como se mencionó anteriormente, el sector delimitado de San Miguel posee cinco (05) Estaciones de Bomberos aledañas.

Se realizó una aproximación de las Estaciones a los nodos más cercanos.

En primera instancia, se determina las Latitudes y Longitudes exactas de cada una de las Estaciones mediante la data extraída anteriormente. Luego, se calcula la distancia elíptica de cada uno de los Nodos definidos hasta cada una de las estaciones. Esta distancia se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta long = long 2 - long 1$$

$$\Delta lat = Lat 2 - Lat 1$$

$$A = \left(\sin\left(\frac{\Delta lat}{2}\right) \right)^2 + \cos(Lat1) \cdot \cos(Lat2) \cdot \left(\sin\left(\frac{\Delta long}{2}\right) \right)^2$$

$$C = 2 * \text{atan2}(\sqrt{A}, \sqrt{1-A})$$

$D = R \cdot C$; donde R es el radio de la Tierra.

Posteriormente, se designaron cinco (05) nodos más cercanos a cada una de las cinco Estaciones. Adicionalmente, es necesario realizar una prueba de ensayo y error para evitar la designación de Estaciones a nodos aislados, es decir, nodos prohibidos o inaccesibles desde los demás nodos del sector delimitado. En por ello que se realizan cálculos de acuerdo a las distancias del nodo Estación determinado y la ubicación real de la Estación de Bomberos, observe la Tabla III.

Tabla III
Aproximación de los Nodos Estaciones y Prueba de Error

Estación	Latitud	Longitud	Nodo ID	Latitud	Longitud	Error(m)
1	-12.059845	-77.09281	1909464689	-12.0598973	-77.0928295	2.52843727
2	-12.080114	-77.065816	2058517269	-12.0797231	-77.0658861	12.4703884
3	-12.085486	-77.07603	606937054	-12.0853586	-77.0759935	5.15050722
4	-12.082339	-77.041998	2064693926	-12.0825376	-77.0419353	8.55423609
5	-12.059593	-77.04629	915282191	-12.0595286	-77.046373	9.37067679

Se observa que las distancias entre los nodos Estaciones y la ubicación real de las Estaciones de Bomberos es de escasos metros, por lo cual el error en la determinación de los Nodos Estaciones es mínimo y por ende despreciable.

C. Aplicación del Algoritmo Dijkstra

La aplicación del Algoritmo de Dijkstra se empleó para la obtención de distancias mínimas desde los cinco nodos de las estaciones de bomberos hasta todos los demás nodos del sector seleccionado. No obstante, antes de la aplicación del algoritmo, se realizó la depuración de nodos y arcos intransitables, es decir rutas prohibidas y puntos inaccesibles, los cuales pueden recurrir en error al ejecutar el programa. Esto se realizó mediante una eliminación de filas al trasponer dos matrices: Matriz de dimensiones $n \times 5$ que contiene la información de

los nodos Estaciones y la Matriz $n \times 1$ que contiene la información de los nodos; esto se indica en el código que se describirá más adelante.

Sobre el particular, la cantidad de nodos en el sector delimitado del estudio es muy grande (aproximadamente 21,000 nodos), por ende, se calculó el Algoritmo de Dijkstra mediante Programación Lineal en el software Matlab. A continuación, bajo el supuesto de que los nodos Estaciones atenderán a los nodos más cercanos, mediante las distancias determinadas de cada nodo hacia los cinco nodos Estaciones. Luego se tomará la distancia mínima a cada nodo Estación y se asignará que el nodo Estación de menor distancia atenderá al nodo cercano. Para visualizar el código, ver el Anexo 1.

En la figura 6 se observa la asignación de cual y cuantos nodos serán atendidos por cada nodo Estación.

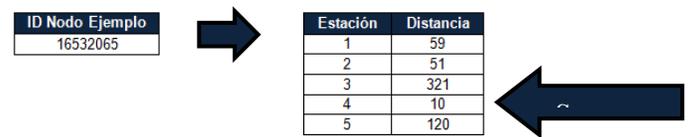


Fig.6 Nodo i atendido por el nodo estación con menor distancia

Adicionalmente, para mostrar visualmente las asignaciones de las distancias mínimas de cada nodo i al respectivo nodo Estación. En la figura 7, cada color representa un Nodo Estación.

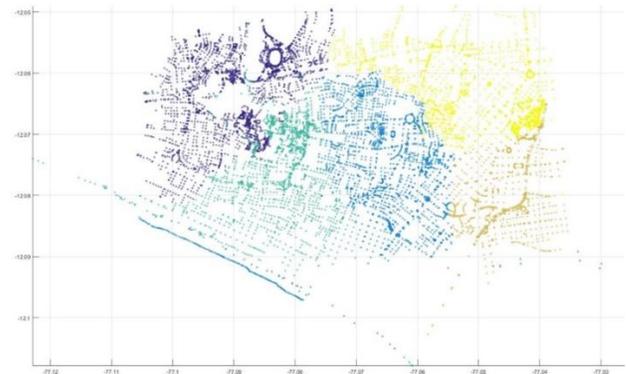


Fig.7 Gráfico Ilustrativo de la Atención de los Nodos Estación en el sector delimitado

D. Indicador de Atención de Accidentes al Ciudadano (INDICADOR)

En base a las distancias mínimas determinadas anteriormente, se puede calcular un indicador que dictamine la capacidad de atención al ciudadano que brinda cada nodo Estación, y por ende, cada nuevo nodo Estación que se esté buscando localizar. En ese sentido, un INDICADOR más cercano a cero implica una mejor atención y se podría determinar el INDICADOR mediante la siguiente fórmula:

$$I_{aprox} = \frac{\sum_n Distancia_n}{n}$$

No obstante, con la formula mencionada se estaría asumiendo que la densidad poblacional sigue el comportamiento de una distribución uniforme por cada nodo, lo cual sería una fuente de error que mermaría en la optimización en la toma de decisiones acerca de una nueva Estación de Bomberos. Por tal motivo, se generó una Regresión Múltiple de la superficie, es decir el sector delimitado, en el cual los datos de entrada son los atributos utilizados (Latitud y Longitud) y los datos de salida son la distancia mínima de atención calculada anteriormente. Dicho ajuste se realiza mediante la siguiente formula:

$$z = F(x, y)$$

$$Función\ Distancia(x, y) = z$$

Cabe resaltar en particular, que la *Función Distancia* se muestra como una función continua por partes debido a que sus variables lo son; no obstante, no necesariamente es continua en su totalidad pues existen puntos en los cuales la pendiente de la función (derivada) no es posible calcular. En tal sentido, la *Función Distancia* se caracteriza por ser una función continua por partes. Por lo cual, para ajustar el error inducido al principio se enfocará en utilizar las herramientas de Interpolación y Extrapolación Lineales de las distancias mínimas obtenidas, lo cual se puede realizar debido a la cercanía de los nodos, y así poder mitigar el error planteado anteriormente. Por lo tanto, la fórmula para el cálculo del INDICADOR corregido se muestra en la siguiente función:

$$I_{corregido} = \frac{\iint FunciónDistancia(x, y) \cdot dx dy}{\iint dx dy}$$

Sin embargo, dado que el sector delimitado posee una forma rectangular, esta fórmula se simplifica a la siguiente forma:

$$I_{corregido} = \frac{\int_{LonMin}^{LonMax} \int_{LatMin}^{LatMax} FunciónDistancia(x, y) dx dy}{(LonMax - LonMin) \cdot (LatMax - LatMin)}$$

Adicionalmente, como se aprecia en el sector delimitado, existen aún zonas que el programa los considera como arcos, sin embargo, son rutas no convencionales; no obstante, existe la posibilidad de atender accidentes en los lugares mencionados. Tal es el caso de las ubicaciones constituidas por el Parque de las Leyendas y el campus universitario de la PUCP. Para evitar este problema, en el programa se eliminó nodos y arcos que generen valores infinitos de distancias mínimas y sus valores fueron reemplazados por las interpolaciones de los valores más cercanos.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El INDICADOR es una herramienta que permite tomar la decisión óptima acerca de la localización de una nueva Estación de Bomberos. Al respecto, para la elección de qué indicador es mejor para colocar la nueva Estación, es necesario saber qué valor se acerca más al cero. Esto se debe a que el INDICADOR precisa cuantificablemente la distancia entre los lugares potenciales de emergencia, hasta un determinado terreno para una potencial Estación. En tal sentido, mientras menor sea el valor, mayor capacidad de atender tendrá, pues existe menor distancia entre tales lugares.

Para la realización del método se asumieron los siguientes supuestos:

- **Velocidad y Aceleración constante:** Se asumió esto por un tema de conveniencia y simplicidad pues si se consideraban ambas variables, la complejidad del programa hubiese sido mayor.
- **Rutas de doble sentido:** Esto permite aprovechar al máximo el Algoritmo de Dijkstra y además ayuda a que el INDICADOR sea cercano a la realidad de la situación propuesta, lo cual permite optimizar la toma de decisiones dado la naturaleza del transporte de los bomberos.
- **Inexistencia de tráfico:** El tráfico es un factor determinante, no obstante, para la presente investigación, no influye de manera significativa en el cálculo del INDICADOR, dado a la naturaleza del transporte de los bomberos.

Sobre el particular, para la aplicación del INDICADOR se realizó una prueba asignando tres (03) nodos Estaciones ubicados al azar, y se determinó el resultado del INDICADOR para la posterior toma de decisión óptima acerca de localizar una Nueva Estación de Bomberos.

El Indicador de la Situación Actual es de 1624.3282 metros.

En la tabla IV se muestra el indicador promedio de la nueva localización de cada estación.

Tabla IV
Aproximación de los Nodos Estaciones y Prueba de Error

Estación	Nodo Estación	Latitud	Longitud	Indicador (m)
01	607235008	-12.0794311	-77.0858407	1395.13932692040
02	1832795763	-12.0649891	-77.0696579	1378.76667237695
03	674944773	-12.0747572	-77.0592615	1531.88941364322

De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla IV, se determina que el Nodo Estación 02 es la decisión óptima para colocar una Nueva Estación de Bomberos.

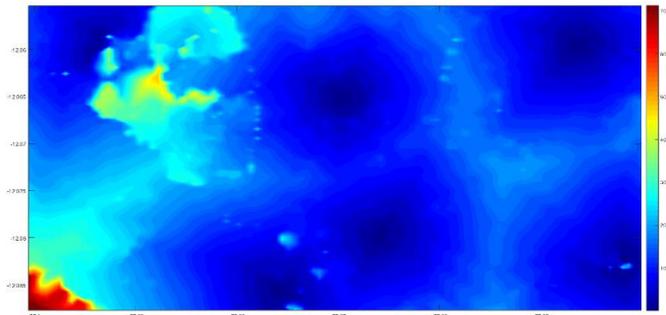


Fig.8 Hotplot de la regresión múltiple de la estación 02

En la figura 8 se muestra la representación de la Regresión Múltiple de la Superficie con la propuesta de aperturar la Estación 02, cuya ubicación será con una latitud de -12.0649891 y una longitud de -77.0696579.

V. CONCLUSIONES

La Teoría de Redes, mediante el Algoritmo de Dijkstra, ayudó al diseño de la metodología para la optimización de la toma de decisiones acerca de la localización de una nueva Estación de Bomberos mediante un Indicador de Atención de Accidentes. Esto demuestra que el Algoritmo de Dijkstra es una herramienta muy útil. Sobre el particular, esta optimización es sumamente útil para el Cuerpo de Bomberos del Perú pues es una herramienta de decisión que permitiría ayudar en la localización de Estaciones nuevas para así cumplir el objetivo primordial, el cual es ayudar de manera óptima a los ciudadanos en situaciones de emergencia.

Adicionalmente, el método planteado posee la facultad de ser muy versátil debido a la capacidad del programa para agregar diversos factores que contribuyen también en la toma de decisiones. Entre los más destacados se encuentran los terrenos disponibles dentro del sector a delimitar y los costos de los mismos. Para la resolución de la metodología planteada fue necesario emplear herramientas de software tales como MatLab y Visual Studio, no obstante, para situaciones más complejas sería conveniente emplear herramientas de software de mayor capacidad.

Para la presente investigación, se ha considerado como fuente confiable la data obtenida del portal Open Street Map, no obstante, al ser un Open Source está propenso a recurrir en errores que pueden afectar directamente en la solución de la problemática planteada.

REFERENCIAS

- [1] El Comercio (2015). Lima tiene la mitad de las estaciones de bomberos que necesita. Publicado el 06 de mayo del 2015. Acceso el 22 de diciembre del 2018. <https://elcomercio.pe/lima/lima-mitad-estaciones-bomberos-necesita-360066>
- [2] E.W. Dijkstra (1959). A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. Acceso el 22 de febrero del 2019.

- [3] Lima Cómo Vamos (2018). IX Informe de percepción sobre calidad de vida en Lima y Callao. Acceso el 22 de febrero del 2019 <http://www.limacomovamos.org/cm/wp-content/uploads/2018/12/EncuestaLimaComoVamos2018.pdf>
- [4] Posada, Carlos (2018). Aumento Continuo del Parque Automotor, un problema que urge solucionar. Acceso el 24 de febrero del 2019. https://www.camaralima.org.pe/repositorioaps/0/0/par/r816_3/comercio%20exterior.pdf
- [5] El Comercio (2018). #NoTePases: la deficiente y peligrosa infraestructura vial de Lima. Acceso: 22 de febrero de 2019. <https://elcomercio.pe/lima/transporte/notepases-deficiente-peligrosa-infraestructura-vial-lima-noticia-522799>
- [6] Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú (2018). Capítulo X: Los Valores Institucionales. Acceso del 22 de febrero del 2019. http://www.bomberosperu.gob.pe/portal/net_historia.aspx
- [7] Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú (2018). Estadísticas de Emergencias a Nivel Nacional del CGBVP. Acceso: 22 de febrero del 2019. http://www.bomberosperu.gob.pe/portal/net_estadistica.aspx
- [8] Ullander, A. (2015). Optimization Based Decision Support Tools for Fire and Rescue Resource Planning. Acceso: 22 de febrero del 2019. <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:789239/FULLTEXT01.pdf>
- [9] Macit, I. (2015) Solving Fire Department Station Location Problem Using Modified Binary Genetic Algorithm: A Case Study of Samsun in Turkey. Acceso: 22 de febrero del 2018. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1033.8568&rep=rep1&type=pdf>
- [10] Taha, Hamdy A. Investigación de Operaciones. Navarro Salas, Rodolfo (trad.). 9na Edición. México: PEARSON EDUCACIÓN, 2012, 824p.
- [11] Jungnickel, Dieter. Graphs, Networks and Algorithms. 2da Edición. Augsburg, Alemania: SPRINGER, 2004, 611 p.
- [12] Books LLC. Spherical Trigonometry: Great Circle, Angle Excess, Spherical Geometry, Spherical Trigonometry, Haversine Formula, Great Circle Distance. Tennessee, USA. 2010, 60p.
- [13] Universidad Nacional del Oeste (2013). Algoritmo Quicksort: Introducción y Descripción del Algoritmo. Acceso el 25 de febrero del 2019. <https://sites.google.com/site/programacioniuno/temario/unidad-6---analis-de-algoritmos/algoritmo-quicksort>

ANEXO 1

```
function [dist,ruta] = dijkstra (nodos,arcos,id_inicio)
id_nodos = nodos(:,1);
[num_nodos,cols] = size(nodos);
tabla = sparse(num_nodos,2);
distancia_mas_corta = Inf(num_nodos,1);
fijado = zeros(num_nodos,1);
ruta = num2cell(NaN(num_nodos,1));
col = 2;
id_nodo_analizando = find(id_inicio == id_nodos);
distancia_mas_corta(id_nodo_analizando) = 0;
tabla(id_nodo_analizando,col) = 0;
fijado(id_nodo_analizando) = 1;
ruta(id_nodo_analizando) = {id_inicio};
while sum(~fijado) > 0
    % refrescar tabla
    tabla(:,col-1) = tabla(:,col);
    tabla(id_nodo_analizando,col) = 0;
    % encontrar los nodos vecinos en la lista de arcos
    id_vecinos = [arcos(id_nodos(id_nodo_analizando) ==
arcos(:,2),3);arcos(id_nodos(id_nodo_analizando) ==
arcos(:,3),2)];
    % calcular las distancias a los nodos vecinos y mantener
el seguimiento de las rutas
    for k = 1:length(id_vecinos)
        id_nodo_actual = find(id_vecinos(k) == id_nodos);
        if ~fijado(id_nodo_actual)
            d =
coord2m(nodos(id_nodo_analizando,3),nodos(id_nodo_actual,3),nodos
(id_nodo_analizando,2),nodos(id_nodo_actual,2));
            if (tabla(id_nodo_actual,col-1) == 0) || ...
```

```

                (tabla(id_nodo_actual,col-1) >
(tabla(id_nodo_analizando,col-1) + d))
                tabla(id_nodo_actual,col) =
tabla(id_nodo_analizando,col-1) + d;
                ruta_temp = ruta(id_nodo_analizando);
                ruta(id_nodo_actual) = {[ruta_temp{1}
id_vecinos(k)}];
            else
                tabla(id_nodo_actual,col) =
tabla(id_nodo_actual,col-1);
            end
        end
    end
    % encontrar el valor mínimo distinto de cero en la tabla
y guardarlo
    valores_tabla = find(tabla(:,col));
    valor_minimo = find(tabla(valores_tabla,col) ==
min(tabla(valores_tabla,col)));
    if isempty(valor_minimo)
        break
    else
        id_nodo_analizando = valores_tabla(valor_minimo(1));
        distancia_mas_corta(id_nodo_analizando) =
tabla(id_nodo_analizando,col);
        fijado(id_nodo_analizando) = 1;
    end
end
dist = distancia_mas_corta';
ruta = ruta';
end

function [ output ] = Procesar(Nodos,Arcos,NInicial,lats,lons)
Distancias=zeros(size(NInicial,2),size(Nodos,1));
Rutas=cell(size(NInicial,2),size(Nodos,1));
for n=1:size(NInicial,2)
[Distancias(n,:),Rutas(n,:)]=dijkstra(Nodos,Arcos,NInicial(n));
end
DistanciaF=zeros(1,size(Distancias,2));
RutaF=cell(1,size(Rutas,2));
for n=1:size(DistanciaF,2)
    DistanciaF(n)=min(Distancias(:,n));
    RutaF(n)=Rutas(find(Distancias(:,n)==DistanciaF(n),1),n);
end
Nod=Nodos;
Nod(isinf(DistanciaF(1,:)),:)=[];
DistanciaF(:,isinf(DistanciaF(1,:)))=[];
f=scatteredInterpolant(Nod(:,2),Nod(:,3),DistanciaF.', 'linear', 'l
inear');
linx=linspace(lats(1),lats(2));
liny=linspace(lons(1),lons(2));
[linx,liny]=meshgrid(linx,liny);
Z=f(linx,liny);
%Hallar el Índice corregido
output = quad2d(@(x,y)
f(x,y),lats(1),lats(2),lons(1),lons(2))/((lats(2)-
lats(1))*(lons(2)-lons(1)));
%Hallar el Índice no corregido
%distn=horzcat(Nod,DistanciaF. ');
%distn(lats(1)>distn(:,2)|lats(2)<distn(:,2)|lons(1)>distn(:,3)|l
ons(2)<distn(:,3),:)=[];
%output = mean(distn(:,4));
end

function [ output ] = coord2m(lat1,lat2,lon1,lon2)
lat1=deg2rad(lat1);
lat2=deg2rad(lat2);
lon1=deg2rad(lon1);
lon2=deg2rad(lon2);
dlon = lon2 - lon1;
dlat = lat2 - lat1;
a = (sin(dlat/2)).^2 + cos(lat1).* cos(lat2).* (sin(dlon/2)).^2;
c = 2 * atan2( sqrt(a), sqrt(1-a) );
d = 6373000 * c;
output=d;
end

```