

# CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE ISÓCRONAS PARA LA ZONA PONIENTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO

***Erick López Ornelas***

Universidad Autónoma Metropolitana Cuajimalpa

*elopez@correo.cua.uam.mx*

***Rocío Abascal Mena***

Universidad Autónoma Metropolitana Cuajimalpa

*mabascal@correo.cua.uam.mx*

***Santiago Avilés Vázquez***

Universidad Autónoma Metropolitana Cuajimalpa

*dragosani24@gmail.com*

## **Resumen**

La mayoría de los mapas representan visualmente la distancia física que existe entre los elementos geográficos, sin embargo, el tiempo de viaje y los traslados, no necesariamente están ligados a estos aspectos geográficos, sino a un conjunto de condiciones que afectan los tiempos de traslado. La técnica para crear mapas a partir de información temporal se le denomina mapas de isócronas, y básicamente representan la distancia a la que podemos trasladarnos a partir de un punto de origen y en un determinado periodo de tiempo.

En este artículo, se desarrolló una aplicación web que calcula, de manera automática, las distancias máximas a las que podemos llegar dado un periodo de tiempo. Esta aplicación genera una visualización del mapa de isócronas y permite realizar consultas interactivas a partir del tiempo deseado.

**Palabras Claves:** Algoritmo Deep First Search, Isócronas, mapas, visualización de Información.

## **Abstract**

*Most maps visually represent the physical distance between existing geographic elements; however, travel time and transfers are not necessarily related to these*

*geographical aspects and travel time is affected by some different conditions. Isochronous map takes temporal information in order to create maps, and basically represent the distance to which we can move from an original point to another on a certain period of time.*

*In this article, we have developed a web application that automatically calculates the maximum distances we can reach given a period of time. This application generates an isochrones map and allows to make interactive queries having a specific time.*

**Keywords:** *Deep First Search Algorithm, information visualization, isochrones, maps.*

## **1. Introducción**

Actualmente el aumento desmesurado de la población en las ciudades es notable, lo que causa una sobrepoblación y un mayor movimiento y desplazamiento de personas por las ciudades. Este fenómeno genera efectos negativos en las dinámicas de las ciudades como la pérdida de tiempo en los traslados, la incapacidad para predecir con exactitud los tiempos de viaje, desperdicio de combustible, aumento de la contaminación del aire, interferencia con los vehículos de emergencia, etcétera [AGU, 2017]. Muchos de estos problemas se deben a la falta de información en el momento adecuado.

Por otro lado, las Tecnologías de la Información y la Comunicación están abordando la vida diaria de todas las personas, y cada vez estas herramientas nos permiten tener más información de las cosas que nos rodean. En este momento tenemos la posibilidad de acceder a la información desde diferentes puntos de acceso como las computadoras o dispositivos móviles y cada vez existe una mayor capacidad de transmisión, velocidad, procesamiento, acceso, control de los datos, lo cual genera una relación cada vez más estrecha entre el hombre y las Tecnologías, logrando de esta manera incrementar el acceso a la información y por ende mejorar la toma de decisiones.

Uno de los conceptos clave en este trabajo es el concepto de isócrona, el cual proviene del griego “igual tiempo”. Este concepto es utilizado en diversas ramas

del conocimiento como en la astronomía, en la geología, en la hidrología, en el geomarketing y en la planificación urbana. Un mapa de isócronas viene definido por un área delimitada por puntos a los cuales el parámetro del tiempo es el mismo, por ejemplo, en la planificación urbana los mapas de isócronas se utilizan comúnmente para describir las áreas de igualdad de tiempo de viaje [Efentakis, 2013].

Teniendo estos elementos en mente, el objetivo de este trabajo es el de construir un prototipo que genere mapas de isócronas y que ayude a los diferentes usuarios a mejorar su movilidad en las Ciudades. Presentamos, como caso de estudio, un ejemplo de aplicación en la zona poniente de la Ciudad de México debido a que es una zona que presenta problemas importantes en materia de movilidad.

De acuerdo a lo anterior, la segunda sección de este artículo presenta los trabajos relacionados y un estado del arte de los conceptos sobre los cuales se cimienta la investigación.

En la sección 3 se describe de manera breve la metodología y el diseño de la propuesta; en la sección 4 se presentan y explican los elementos importantes para el desarrollo e implementación de los mapas de isócronas. En la sección 5, se plantea un caso de estudio analizando la aplicabilidad de los mapas de isócronas en la zona poniente de la Ciudad de México. Por último, en la sección 7 y 8 se expone la discusión y las conclusiones asociadas a la aplicación implementada, así como las acciones futuras.

### **Los Mapas de Isócronas**

Los mapas de isócronas se utilizan comúnmente para describir las áreas de igualdad de tiempo de viaje. El concepto de isócrona se deriva del griego “igual tiempo”, es decir que un mapa de isócronas, es un mapa que muestra las áreas relacionadas con respecto al tiempo. La isócrona se define como una línea dibujada en un mapa, carta o diagrama en donde ocurre algo en un tiempo específico, a esta línea se le llama isolínea y es la que conecta los puntos que tienen el mismo valor en la magnitud del tiempo. Los puntos que delimitan las isócronas se forman a partir de una ubicación origen [Efentakis, 2013].

Las isócronas han sido utilizadas normalmente para mostrar los niveles de facilidad de accesibilidad a un área de influencia. En este artículo se realizó un análisis de trabajos relacionados alrededor de este tema, escogiendo algunas similitudes de los algoritmos de construcción de isócronas realizadas por [Mayhew, 1981] para centros de emergencias médicas y [Armstrong, 1972] para el aeropuerto de South Hampshire.

Los usos de mapas de isócronas se diversifican dependiendo del tipo de información, y ha sido utilizado en la hidrología, planeación urbana o centros de emergencia médica, donde en cada estudio lo que se mantiene es el tiempo como referencia para construir las isócronas.

En hidrología las isócronas se han utilizado para mostrar el tiempo que tarda el agua en realizar algún recorrido, como en [Subramanya, 2009], donde se muestra el tiempo que tarda en escurrir el agua de una cuenca a un lago suponiendo que la lluvia es constante y uniforme. Otro ejemplo claro del uso de mapas de Isócronas se ilustra en el “Unit Hydrograph Technical Manual” [NOAA, 2015] para conocer el tiempo de viaje del agua en una cuenca. Usando este enfoque espacio temporal, se puede dividir la cuenca en áreas de tiempos aproximados de viaje del agua, donde las líneas que dividen la cuenca tienen el mismo tiempo de viaje y son las llamadas Isócronas.

El uso de isócronas en la planificación urbana y en específico del transporte han sido igualmente utilizadas. En este ámbito se pueden crear mapas de viaje para diferentes medios de transporte, por ejemplo, a pie, en bicicleta, vehículos. En el año de 1972 se hizo un primer estudio sobre las isócronas para la accesibilidad del aeropuerto de Hampshire, Inglaterra. Las isócronas calculadas en este estudio, utilizaban el método de la ruta más corta mediante una estructura de grafos y donde los vértices eran los diferentes puntos de interés [Armstrong, 1972].

Por otro lado, [Mayhew, 1981] describe un método para el cálculo automático y reproducción gráfica de isócronas alrededor de los centros médicos de emergencia en las grandes ciudades. Las isócronas se establecen para diferentes estándares de tiempo y para las variaciones de las condiciones del tráfico. La técnica se basa en el concepto de un campo de velocidad.

No podemos dejar a un lado los SIG (Sistemas de Información Geográfica) que son aplicaciones informáticas que permiten a los usuarios la gestión, almacenamiento, manipulación, análisis, modelización de grandes cantidades de datos y que están relacionados a una referencia espacial. Estas herramientas facilitan la incorporación de aspectos sociales, culturales, económicos, ambientales y ayudan a la toma de decisiones de una manera más eficaz en diferentes plataformas como aplicaciones de escritorio, Web y en mayor medida para aplicaciones móviles [Heywood, 2006].

Actualmente gracias al Internet se han construido diferentes aplicaciones para visualizar trayectorias y duración de viaje utilizando datos obtenidos de la cartografía y datos públicos. Google Maps se ha mostrado líder en aplicaciones de mapas en la web, ya que este ofrece imágenes de mapas desplazables, fotografías por satélite, trayectorias, rutas entre diferentes ubicaciones, y sin dejar de mencionar imágenes a pie de calle bajo el nombre de Google Street [Google Maps, 2017].

Las aplicaciones móviles actuales para la construcción y visualización de mapas cuentan con bases de datos enormes y algoritmos cada vez más eficientes para el trazo de rutas más cortas, algunos ejemplos son Waze, OsmAnd, MapFactor o SmartNavi, sin embargo, aún no cuentan con la visualización de mapas de isócronas de manera intensiva, siendo que la visualización de la información territorial usando mapas de isócronas es una buena opción demostrada por los SIG [Huoran, 2015].

## **2. Métodos**

Para el desarrollo de esta aplicación basada en mapas de isócronas se identificaron 3 fases, las cuales se detallan a continuación:

- **Fase 1:** Inicialmente se decidió identificar una zona que tuviera problemas de movilidad y tráfico y la cual se tuviera un amplio conocimiento para poder realizar un estudio de campo para identificar las problemáticas asociadas. En este contexto se decidió trabajar en una etapa inicial en la zona poniente de la Ciudad de México.

- **Fase 2:** Posteriormente se realizó una búsqueda para definir cuál sería el algoritmo apropiado que se adaptara a los requerimientos de la zona. En este punto se decidió utilizar el algoritmo DFS (Deep First Search), el cual se explicará en la siguiente sección.
- **Fase 3:** Utilizando tecnologías web, se realizó la implementación, generándose una red de nodos ligados a una base de datos para poder verificar los tiempos de traslado. Finalmente se realizaron un conjunto de pruebas con los usuarios, los cuales validaron los resultados obtenidos a partir del uso del prototipo.

Las herramientas tecnológicas utilizadas fueron el API de Google Maps para la generación de la interfaz y el uso de Apache para implementar el modelo cliente-servidor con un acceso a una base de datos mediante MySQL.

El desarrollo propuesto para el prototipo se basa en la necesidad de construir una isócrona a partir de una consulta del usuario. Esta consulta es el tiempo máximo requerido de desplazamiento, a partir de esta consulta se construye el mapa base, se genera la red de nodos y mediante el algoritmo implementado se hace la selección pertinente. Finalmente se construye la interfaz con el mapa de la isócrona asociada al tiempo requerido. Cada cambio en la consulta del tiempo realizada por el usuario, muestra como resultado una interfaz diferente con su respectivo mapa de isócrona. La propuesta de Diseño es la siguiente se muestra en figura 1.

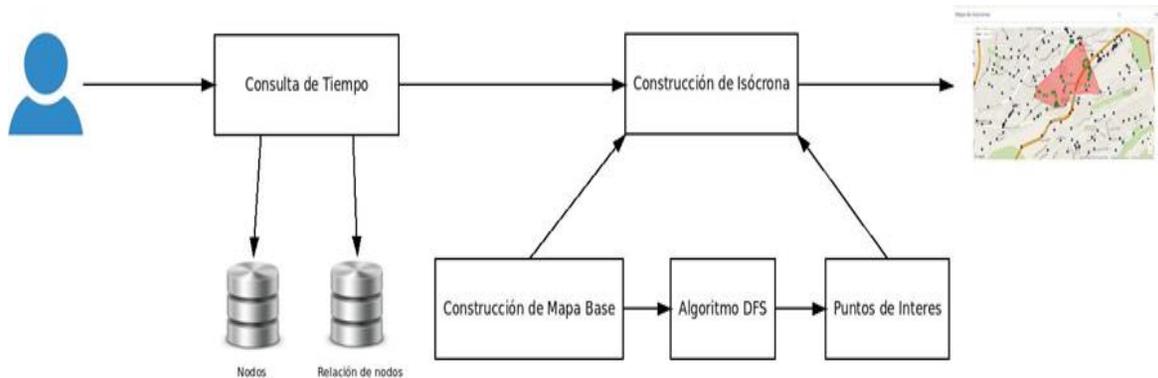


Figura 1 Propuesta de diseño para la construcción de mapas de isócronas.

### **3. Resultados**

En esta sección, se realizaron 3 pasos importantes, la extracción, la implementación del algoritmo a utilizar, el cálculo de tiempos y la visualización de la isócrona. Dichos elementos se explican a continuación.

#### **Extracción de Mapas Base**

Para poder empezar con el desarrollo de esta aplicación es fundamental extraer el mapa base, es decir, poder importar los mapas de Google Maps mediante el uso de la API de desarrollo. Esta API está desarrollada en Javascript, lo que facilitó el desarrollo en la plataforma Web ya que al ser un lenguaje de programación que maneja el DOM (Document Object Model) se convierte en la parte esencial para la representación de documentos HTML dinámicos en la parte del cliente. Esto hace posible el manejo de la interfaz de manera dinámica.

Por otro lado, Google Maps utiliza el lenguaje XML para ordenar los datos y hacer uso de la información necesaria para la representación de los nodos como marcadores en el mapa. En este caso se construyó una base de datos relacional donde se almacena la información relacionada a los nodos como: el nombre, el tipo de nodo para su representación, longitud y latitud.

#### **Construcción de una red de nodos**

La construcción de la red de nodos se hace posible almacenando las coordenadas de posición latitud y longitud de cada nodo usando el sistema WSG84. Este formato de coordenadas es necesario para el uso de la API de Google Maps. Cada nodo se debe encontrar posicionado en un eje vial real de la ciudad, como calles y avenidas para de esta forma, construir la red de nodos para su análisis en cada intersección.

Para la construcción de la red de nodos se establecieron las relaciones de los nodos enfocados a la movilidad utilizando vehículos particulares, por lo que se tomó en cuenta el sentido de las calles, la distancia y el tiempo aproximado entre los nodos. Las relaciones de los nodos en la base de datos reflejan estas características. Es importante mencionar que, dependiendo del sentido de las

calles, puede cambiar el tiempo entre nodos por las características del territorio, por ejemplo, si la calle se encuentra en una pendiente arrancar es más difícil de subida que de bajada.

### Algoritmo de Búsqueda DFS (Deep First Search)

Una vez almacenado el grafo en la base de datos, tuvimos que encontrar un algoritmo de búsqueda, el cual recorriera los nodos y realizara los cálculos adecuados. Se escogió el algoritmo DFS por su capacidad eficiente para recorrer grafos [Cormen, 2001]. Este es un algoritmo que permite recorrer todos los nodos de un grafo de manera ordenada, pero no uniforme. Su funcionamiento consiste en ir expandiendo todos y cada uno de los nodos que va localizando, de forma recurrente, en un camino concreto. Cuando ya no quedan más nodos que visitar en dicho camino, regresa, de modo que repite el mismo proceso con cada uno de los hermanos del nodo ya procesado. Este algoritmo entonces, nos permite saber en qué nodos del árbol se encuentra el tiempo que delimita la isócrona. El algoritmo se describe en la figura 2.

```
DFS(grafo G)
  PARA CADA vértice u ∈ V[G] HACER
    estado[u] ← NO_VISITADO
    padre[u] ← NULO
  tiempo ← 0
  PARA CADA vértice u ∈ V[G] HACER
    SI estado[u] = NO_VISITADO ENTONCES
      DFS_Visitar(u, tiempo)

DFS_Visitar(nodo u, int tiempo)
  estado[u] ← VISITADO
  tiempo ← tiempo + 1
  d[u] ← tiempo
  PARA CADA v ∈ Vecinos[u] HACER
    SI estado[v] = NO_VISITADO ENTONCES
      padre[v] ← u
      DFS_Visitar(v, tiempo)
  estado[u] ← TERMINADO
  tiempo ← tiempo + 1
  f[u] ← tiempo
```

Figura 2 Pseudocódigo del algoritmo DFS.

La búsqueda en profundidad se basa en el tiempo de la isócrona, es decir, se van sumando los valores del tiempo que corresponden a cada nodo mientras se va analizando el grafo, de esta forma, el resultado final es el tiempo máximo de recorrido para cada uno de los nodos.

### **Cálculo de Tiempo y División en Cuadrantes**

Para determinar los tiempos, es necesario tener un cálculo a priori de los tiempos entre cada nodo en la tabla de relaciones, que en un caso ideal se pudieran calcular realizando un trabajo de campo para poder verificar los tiempos verdaderos.

La distancia entre nodos de acuerdo al sistema de coordenadas utilizado se basa en la distancia euclidiana. Para fines reales se deben establecer las características del territorio, es decir si la calle o avenida tiene topes, semáforos, si tiene pendiente favorable o desfavorable, si esta pavimentada y si se encuentra en un cruce o intersección de calles. Cabe mencionar que para este trabajo no se tomaron en cuenta las zonas escolares, hospitales o de algún otro tipo.

La división en cuadrantes, surge a partir de la necesidad de tomar menos puntos para la construcción de la isócrona, ya que al aumentar el número de nodos en el mapa aumenta el número de puntos con los que se puede calcular la isócrona y existen casos en el que muchos puntos se encuentran cercanos y es irrelevante, para nuestro caso, hacer pasar la isócrona por todos los puntos.

La finalidad de la división de cuadrantes es que, a partir del punto inicial de la construcción de la red de nodos, se pueda hacer una división en pastel, es decir que se tome de referencia el punto inicial y este se divide en el número de ángulos que se requiera. La idea es tomar solamente el nodo más lejano por cuadrante y a partir de estos visualizar isócrona, figura 3.

### **Construcción de la Isócrona**

Los nodos consultados a partir de la selección de los nodos por cuadrante, son los que se utilizan para la construcción de la isócrona. Para realizar la construcción de la isócrona se unen los puntos seleccionados o filtrados, estos

puntos como se mencionó anteriormente son los puntos más lejanos seleccionados dentro de cada cuadrante. La unión de estos puntos se hace mediante líneas, las cuales forman un polígono al que llamamos isócrona.

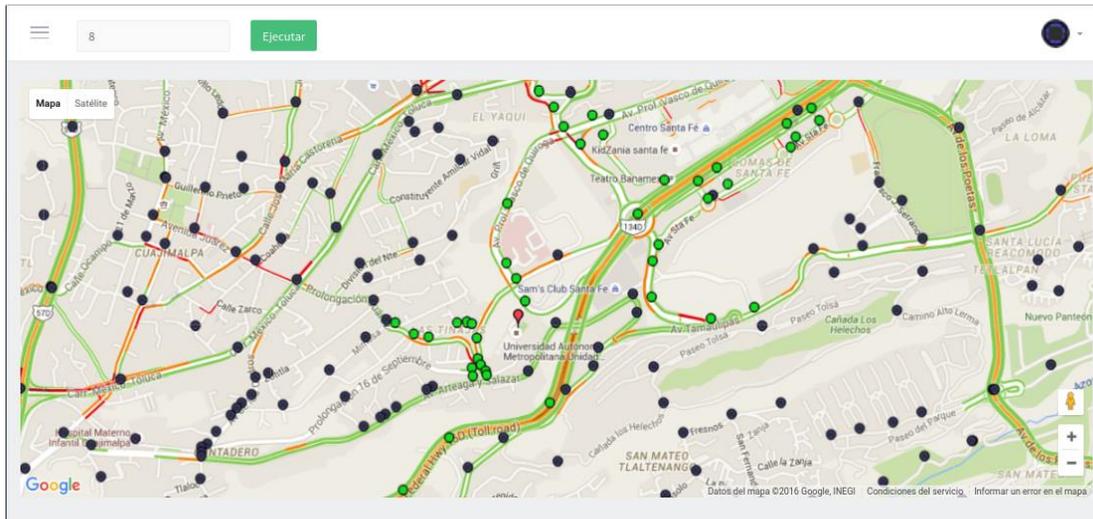


Figura 3 Nodos de la base de datos y recorrido del grafo indicado por los puntos verdes.

La parte gráfica de la construcción de la isócrona, es decir, los mapas, las líneas, las áreas pintadas, el nombre de las calles, la congestión vehicular, el marcado de calles y avenidas, es proporcionado por la API de Google Maps.

### Visualización de Mapas de Isócronas

En esta sección mostramos un conjunto de consultas realizadas en la zona poniente de la Ciudad de México. Al introducir el tiempo a consultar en la caja de diálogo, automáticamente se despliegan la totalidad de los nodos definidos en color negro y el punto inicial en color rojo. A partir de este punto inicial se construye el grafo. Los recorridos se ven reflejados mediante los nodos en color verde, tal y como se observa en la figura 3.

A continuación, se muestra la interfaz y las consultas realizadas para distintos periodos de tiempo, figura 4, 5 y 6. En estos ejemplos se puede apreciar la construcción de la isócrona y cómo cambia dependiendo de diferentes tiempos de traslado. En estos ejemplos se utilizó siempre el mismo punto de origen para realizar el trazo de la isócrona.

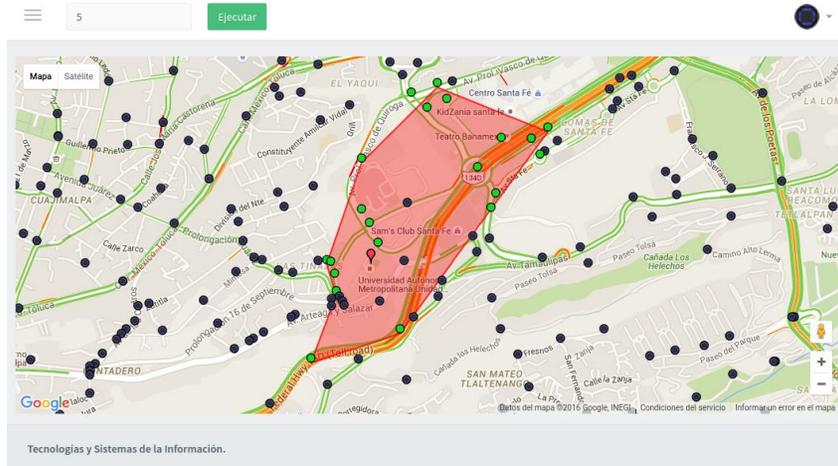


Figura 4 Mapa de isócrona para tiempo igual a 5 minutos.

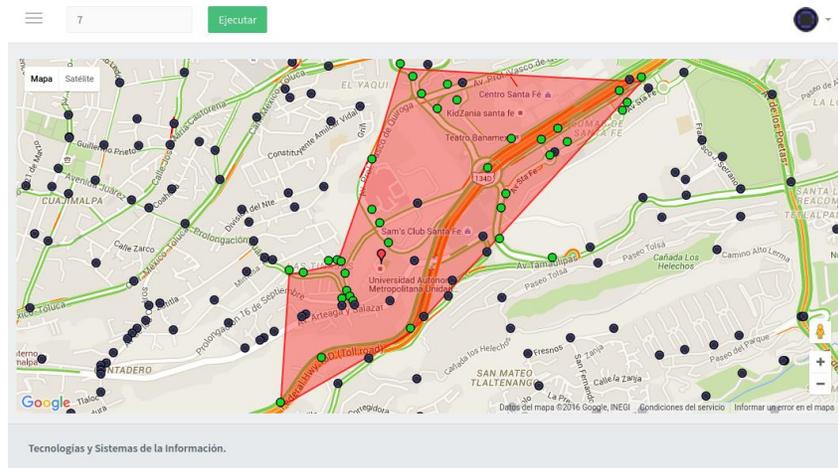


Figura 5 Mapa de isócrona para tiempo igual a 7 minutos.

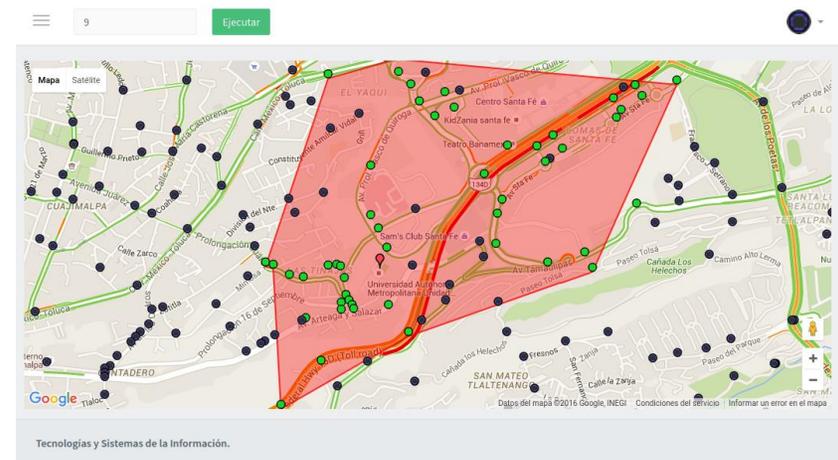


Figura 6 Mapa de isócrona para tiempo igual a 9 minutos.

## **4. Discusión**

Las Tecnologías de la Información están cada vez más presentes en nuestra vida cotidiana. Existen muchos avances que facilitan la vida de cada uno de los usuarios. Estamos convencidos que la movilidad es un problema importante en las grandes ciudades y que pueden existir un conjunto de aplicaciones tecnológicas que ayuden a solucionar este problema. La construcción de mapas de isócronas, muestran las distancias máximas donde podemos desplazarnos un determinado tiempo. Estamos convencidos que una herramienta de este estilo podrá ayudar en la visualización de mayor información para los usuarios, ayudando a que estos usuarios tomen mejores decisiones en sus desplazamientos cotidianos. Una aplicación de este estilo, podría perfectamente complementarse con las aplicaciones relacionadas con la movilidad que actualmente se utilizan (Google Maps o Waze).

## **5. Conclusiones**

En este artículo se mostró el proceso completo de construcción de mapas de isócronas. De igual forma, se planteó su utilidad y la forma en que el usuario puede realizar consultas respecto a los tiempos máximos de recorridos. La construcción de mapas de isócronas puede ser de gran ayuda para poder realizar mejores desplazamientos en las grandes ciudades. Puede ayudar tomar mejores decisiones sobre a dónde ir, por dónde ir y hasta dónde podría llegar. Además, gracias al uso de la API de Google Maps se facilita la implementación, representación y reutilización de los mapas.

Dentro del desarrollo de este trabajo se encontraron un conjunto de problemas, los cuales deberían de considerarse en trabajos futuros, para poder mejorar la versión de la aplicación. De los más importantes podemos mencionar los siguientes:

Falta una manera automatizada para poder definir los nodos, debido a que el proceso manual puede depender del número de nodos a definir. Si pensamos en la CDMX, serían millones.

Es necesario contar con retroalimentación en tiempo real de los usuarios de esta aplicación con respecto a la información del territorio para mejorar la exactitud del

cálculo de la isócrona, es decir, que los usuarios puedan mandar datos de que es lo que sucede a su alrededor en tiempo real, como accidentes, baches, fallas en el sistema vial, cierres, y puedan tomarse en cuenta en la construcción.

Agregar puntos de interés personalizados, como hospitales, bancos, escuelas, cafeterías, etc., así como mejorar el tiempo real de traslados entre los nodos, dependiendo de horarios y condiciones reales de tráfico.

Finalmente podemos decir, con el objetivo de enriquecer el proyecto, que es recomendable realizar una evaluación minuciosa para confirmar la precisión de los tiempos representados por la isócrona construida.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] AGU, Agencia de Gestión Urbana de la Ciudad de México. Incidentes viales del DF enero agosto 2014. Consultado 15 de enero de 2017.
- [2] Armstrong, H. W., A Network Analysis of Airport Accessibility in South Hampshire. *Journal of Transport Economics and Policy*, 1972.
- [3] Cormen, TH., Leiserson, CE., Rivest, RL., Introduction to Algorithms, Second Edition. MIT Press and McGraw-Hill, ISBN 0-262-03293-7. Section 22.3: Depth-first search, pp.540–549, 2001.
- [4] Efentakis, A., Grivas, N., Lampranidis, G. Magenschab, G., Isochrones, traffic and DEMOgraphics. In Proceedings of the 21st ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems (SIGSPATIAL'13). ACM, New York, NY, USA, pp. 548-551, 2013.
- [5] Google Maps, Javascript API V3 Reference: <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/reference>, 2017.
- [6] Heywood, I., Cornelius, S., and Carver, S., An Introduction to Geographical Information Systems. Prentice Hall. 3rd edition, 2006.
- [7] Huoran Li, Xuan Lu, Xuanzhe Liu, Tao Xie, Kaigui Bian, Felix Xiaozhu Lin, Qiaozhu Mei, and Feng Feng, Characterizing Smartphone Usage Patterns from Millions of Android Users. In Proceedings of the 2015 Internet Measurement Conference (IMC '15). ACM, New York, NY, USA, pp. 459-472, 2015.

- [8] Mayhew, L. D., Automated isochrones and the locations of emergency medical services in cities. *The Professional Geographer*, 33: pp. 423–428. doi: 10.1111/j.0033-0124.1981.00423.x, 1981.
- [9] NOAA, The National Operational Hydrologic Remote Sensing Center. Unit Hydrograph (UHG) Technical Manual, 2015: [http://www.nohrsc.noaa.gov/technology/gis/uhg\\_manual.html](http://www.nohrsc.noaa.gov/technology/gis/uhg_manual.html), 23 de octubre de 2015.
- [10] Subramanya, K., *Engineering Hydrology*. Mc Graw-Hill, 3rd edition, 2009.