

Planificación de Posicionamiento Satelital Multiconstelación en Entornos Urbanos

Michael Sneider Puentes Palacio

Trabajo de grado para optar el título de:
Magister en ingeniería de sistemas e informática

Director:

Ph.d. Raúl Ramos Pollán

Codirector:

Ph.d. Carlos Jaime Barrios Hernández

Universidad industrial de Santander

Facultad de ingenierías físico-mecánicas

Escuela de ingeniería de ingeniería de sistemas e informática

Bucaramanga

2018

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander

A la escuela de Sistemas e Informática

*A mis directores de proyecto, Raúl Ramos y Carlos Barrios por sus consejos y orientación
durante todo el proceso*

Al Grupo de Investigación: Cómputo Avanzado y a Gran Escala (CAGE)

A mi Familia y Duquesa por su incondicional apoyo hasta el culminar de este proyecto.

Tabla de Contenido

Introducción	15
1. Objetivos	17
2. Generalidades.....	18
2.1. Constelaciones	19
2.2. Cálculo de posicionamiento.....	20
2.3. Disponibilidad satelital en entornos urbanos	24
2.4. Proyección estereográfica	25
3. Método para planificación de rutas	29
3.1. Obtención de imágenes	30
3.2. Posición satelital	31
3.3. Segmentación de imágenes	34
3.4. Proyección de la posición satelital	36
3.5. Planificación de rutas óptimas con disponibilidad satelital en entornos urbanos.	40
4. Validación del método propuesto	47
4.1. Dos rutas cortas.....	47
4.2. Comparación de tres rutas extensas	53
4.3. Comparación de ruta con mismo tiempo transcurrido	58
5. Conclusiones	60
6. Recomendaciones	62

Bibliografía 63

Apéndices..... 67

Lista de Figuras

Figura 1. Obstrucción de la señal satelital en entornos urbanos. (Izquierda) Seguimiento GPS discontinuo (Derecha). Modificado de https://goo.gl/VpZy7i	18
Figura 2. Relación de la posición del satélite frente al receptor. Tomado de https://goo.gl/eM3pmd	22
Figura 3. Vehículo con receptor de posicionamiento satelital, con observación de 4 satélites. Modificado de https://goo.gl/rSY7DZ	22
Figura 4. Proyección estereográfica de una imagen panorámica. Tomado de https://goo.gl/U2VdJT	25
Figura 5. Proyección de un punto de una esfera sobre una superficie (proyección estereográfica). Tomado de https://goo.gl/6GLqVR	26
Figura 6. Proyección estereográfica y su representación en diagrama y vista lateral (Oh et al., 2000)	28
Figura 7. Método propuesto para planificar una ruta óptima con satélites disponibles en un entorno urbano.	29
Figura 8. Mapa con rutas disponibles por <i>Google Maps</i>	30
Figura 9. Imagen panorámica dada por <i>Google Street View</i> . Lon: 40.7286916, lat: 73.1172572	31
Figura 10. Diferencia de elevación desde un receptor fijo, calculada con archivo RINEX del día (rojo), y elevación del satélite calculado un día antes con archivos TLE (azul). Comparando en las observaciones del día de uno de los satélites GPS.....	33

Figura 11. Diferencia de máximo error calculado con archivos TLE, frente a la posición leída de los archivos RINEX durante 110 días. se muestran dos satélites proyectados de la constelación GPS.	34
Figura 12. Obstrucción de la señal satelital con la proyección estereográfica a partir de <i>Google Street View</i> e identificación de los edificios con la segmentación del cielo disponible. Modificado de https://goo.gl/T95KFZ	36
Figura 13. Segmentación semántica de imagen panorámica tomada de un punto de la ciudad dentro de la ruta seleccionada.	36
Figura 14. Representación de la posición de los satélites en un punto de la ciudad con edificios presentes.....	38
Figura 15. Cambio de la disponibilidad de satélites en un día (1440 minutos) para un punto de la ciudad, dónde el límite para lograr la trilateración es 4, y se separa la constelación GPS, GLONASS, y la suma de los satélites encontrados en ese momento.	39
Figura 16. Histograma de disponibilidad de satélites en un día: (izquierda) Teniendo en cuenta la constelación GPS y GLONASS. (derecha) teniendo en cuenta la constelación GPS. En ambas gráficas la cantidad de satélites inferiores a 4 se representan en color rojo.	39
Figura 17. Ruta establecida en la ciudad de Nueva York para recorrido del vehículo con seguimiento de posición satelital, desde Mercer Street con West 4th Street, hasta Thompson Street con Bleecker Street.	40
Figura 18. Satélites ubicados en una proyección estereográfica con coordenadas de elevación y azimut. (izquierda) Imagen no segmentada, (derecha) Imagen segmentada.	41

Figura 19. Satélites disponibles dentro de una ruta. El eje X corresponde a la distancia de la ruta representado en el tiempo que toma en recorrer la ruta, y el eje Y corresponde a la cantidad de satélites disponibles en un momento.....	42
Figura 20. Posibles rutas cada 2 segundos con constelación GPS. Eje X pertenece a la ruta establecida, y el eje Y pertenece a la cantidad de satélites disponibles por ruta e igualmente la cantidad de rutas que inician a distinta hora.	43
Figura 21. Posibles rutas generadas cada 2 segundos con constelaciones GPS y GLONASS al tiempo.	44
Figura 22. Segmento de rutas posibles para con constelación GPS cada 2 segundos.	45
Figura 23. Segmento de rutas posibles para con constelación GPS y GLONASS cada 2 segundos	46
Figura 24. Ruta validación (246 Mercer St, New York, NY 10012, y 696 Broadway, New York, NY 10003, EE. UU.).....	47
Figura 25. Ruta de validación con diferentes obstáculos presentes.....	48
Figura 26. Planificación de la ruta óptima de disponibilidad de posición satelital en un entorno urbano denso. Donde el eje Y corresponde a la hora de partida que hará el vehículo, y el eje X corresponde a la ruta trazada. 696 Broadway es el inicio de la ruta, y finaliza en 10W, 3rd St. ...	50
Figura 27. Planificación de la ruta con la mejor opción de disponibilidad de posición satelital en un entorno urbano, representada en un mapa de la ciudad de Nueva York. (a) vista superior 2D. (b) vista en 3D. La parte resaltada en rojo es la zona crítica de la ruta.	51
Figura 28. Ruta secundaria entre (246 Mercer St, New York, NY 10012, y 696 Broadway, New York, NY 10003, EE. UU.).....	52
Figura 29. Comparación de Ruta A y Ruta B a las 7:00 a.m.....	53

Figura 30. Validación en rutas diferentes rutas de NewYork, desde Mercer Street con West 4th Street, hasta Thompson Street con Bleecker Street.	54
Figura 31. Segmentación en distintas zonas de la validación de distintas rutas en NewYork.	55
Figura 32. Validación de las 3 rutas en zona de NewYork con receptor GNSS.....	55
Figura 33. Validación de las 3 rutas en zona de NewYork con receptor GPS.	56
Figura 34. Cantidad de satélites disponibles en la ruta analizada en ruta extensa con receptor GNSS.	56
Figura 35. Cantidad de satélites disponibles en la ruta analizada en ruta extensa con receptor GPS.	57
Figura 36. Validación de ruta Broadway Street con East 8th Street, hasta Waverly PI con University PI	58
Figura 37. Validación de las 2 rutas en zona de NewYork con receptor GNSS.....	59
Figura 38. Validación de las 2 rutas en zona de NewYork con receptor GPS	59
Figura 39. Cantidad de satélites disponibles en la ruta analizada en ruta con receptor GNSS.....	60
Figura 40. Cantidad de satélites disponibles en la ruta analizada en ruta con receptor GPS.....	60

Lista de Tablas

Tabla 1. Diferencia de las propiedades de las constelaciones <i>GPS</i> y <i>GLONASS</i>	20
Tabla 2. Descripción Línea 1 de formato TLE	74
Tabla 3. Descripción Línea 2 de formato TLE	75

Lista de Apéndices

APENDICE A. Descripción Modelo SGP	67
APENDICE B. Descripción formato TLE	74

Resumen

Título: PLANIFICACIÓN DE POSICIONAMIENTO SATELITAL MULTICONSTELACIÓN EN ENTORNOS URBANOS *

Autor: Michael Sneider Puentes Palacio**

Palabras clave: Planificación de rutas, Entornos urbanos, Deep Learning, Posicionamiento satelital.

Descripción:

Un posicionamiento mediante un servicio GNSS (Sistema global de navegación por satélite) como la constelación de satélites GPS de EE. UU. o la constelación GLONASS de Rusia, solo es posible con la recepción simultánea de la señal de al menos cuatro satélites. La probabilidad de pérdida de visibilidad de los satélites GNSS en entornos urbanos es especialmente crítica por los elementos arquitecturales propios de una ciudad, pudiendo degradar o hasta imposibilitar la localización de un receptor. Dado que los satélites GNSS no son geoestacionarios y su posición respecto a un observador evoluciona con el tiempo, su visibilidad depende del momento del día y la localización geográfica. Si además se incluye un observador móvil en un entorno urbano, la calidad y disponibilidad de un servicio GNSS adquiere una dinámica especialmente compleja. Esto será crucial para ciertas aplicaciones, por ejemplo, un vehículo transportador de valores requiere un monitoreo continuo de su posición. Conociendo de antemano la ubicación de los satélites a través de sus posiciones en sus respectivas órbitas y las obstrucciones que tendrá un recorrido planificado en un entorno urbano, se puede establecer la relación de visibilidad entre un observador y los satélites de un servicio GNSS y, por tanto, ajustar el recorrido planificado garantiza la continuidad del servicio de posicionamiento durante el mismo. Este trabajo describe un método para calcular la disponibilidad de satélites en un tiempo programado a través de un camino establecido en un entorno urbano denso, integrando el cálculo de la posición de los satélites a través de la mecánica orbital, con imágenes de *Google Street View* y segmentación semántica con técnicas de *Deep Learning*. De esta manera, predecir la relación de visibilidad entre un observador y los satélites de un servicio GNSS en un entorno urbano.

*Trabajo de grado

**Facultad de Físico-Mecánica. Escuela de Sistemas e Informática. Director: PhD. Raúl Ramos. Codirector: PhD. Carlos J. Barrios.

Abstract

Title:

Mission planning with multiconstellation for urban environments *

Authors: Michael Sneider Puentes Palacio**

Keywords: Satellite positioning; Urban Environment, Deep Learning, Mission planning

Description:

A positioning through a GNSS service (Global Navigation Satellite System), such as the constellation of US GPS satellites or the Russian GLONASS, is only possible with the simultaneous reception of the signal from at least four satellites. The probability of GNSS satellites visibility loss in urban environments is especially critical due to the architectural elements typical of a city, being able to degrade or even make it impossible to locate a receiver. Since GNSS satellites are not geostationary and their position with respect to an observer evolves over time, their visibility depends on the time of day and geographic location. If a mobile observer is also included in an urban environment, the quality and availability of a GNSS service acquires a particularly complex dynamic. This will be crucial for certain applications, for example, an armored car carrying valuables requires continuous position monitoring. Knowing in advance the location of the satellites through their positions in their respective orbits and the obstructions that a planned route in an urban environment will have, the visibility relation between an observer and the satellites of a GNSS service can be established and, for Therefore, to adjust the planned route, guarantees the continuity of the positioning service during the same. This work describes a method to calculate the availability of satellites in a programmed time through a path established in a dense urban environment, integrating the calculation of satellites' position through orbital mechanics, with Google Street View images and semantic segmentation with Deep Learning techniques. In this way, establish the visibility relationship between an observer and the satellites of a GNSS service in an urban environment.

*Graduation Project

** Facultad de Físico-Mecánica. Escuela de Sistemas e Informática. Director: PhD. Raúl Ramos. Codirector: PhD. Carlos J. Barrios.

Introducción

Las señales obtenidas por un receptor del sistema de posicionamiento satelital, se ven reducidas en entornos urbanos por las altas edificaciones o, las calles estrechas (Groves, 2011). Esto ocurre por la obstrucción de la señal que se presenta por las edificaciones cercanas al receptor. El cálculo de la posición satelital en entornos urbanos es usado para el seguimiento de vehículos con receptores GNSS que requieran un monitoreo continuo. Un vehículo con una carga de valor que requiera un seguimiento satelital con su posicionamiento, no debe perderse del monitoreo dentro de la ciudad; unos metros de falta de seguimiento pueden significar una gran pérdida (Amini, Vaghefi, De La Garza, & Buehrer, 2014). En la actualidad se han desplegado diferentes constelaciones de satélites para ofrecer servicios de posicionamiento; fuera de la constelación NAVSTAR-GPS más conocida como GPS, Rusia ofrece GLONASS, la cual es una constelación totalmente desplegada para obtener posicionamiento global. Por otro lado, la unión europea y China han puesto en funcionamiento Galileo y Beidou respectivamente, las cuales, aunque funcionales no están totalmente desplegadas. El término GNSS (*Global Navigation Satellite System*) se refiere a todas las constelaciones en general (García Álvarez, 2008). En la actualidad, pocos receptores de señal satelital tienen la capacidad de consignar señales multiconstelación. Estos receptores pueden obtener más disponibilidad de satélites al momento de calcular posicionamiento (White & Langley, 2009). Este trabajo propone un método para calcular la disponibilidad de satélites en un tiempo programado a lo largo de una ruta establecida en un entorno urbano denso. Para ello, se integran métodos de *Deep Learning* para lograr segmentación semántica de imágenes provenientes de *Google Street View*, y se calcula el posicionamiento de los de satélites pertenecientes a las constelaciones GPS y GLONASS.

Los parámetros de la órbita de cada satélite se emiten dentro de la señal que envía a los receptores, y también se almacena dicha información en redes de servidores de todo el mundo. La posición del satélite se puede propagar a través del tiempo con la mecánica de la órbita. El modelo de propagación que ha sido utilizado en este trabajo de investigación para estimar la posición de cada satélite es el modelo SGP4, junto con el formato TLE (Dong & Chang-yin, 2010). El máximo error encontrado comparando la posición calculada a través del tiempo, con la posición calculada a través el formato RINEX, es menor a 2 grados. El modelo SGP4 se utiliza para determinar la posición del satélite que tendrá en un determinado momento; esta posición será proyectada a unas coordenadas de elevación y azimut. Ya que se debe mostrar en un mismo plano de coordenadas la posición de los satélites y las edificaciones presentes, se hace una proyección estereográfica tanto a la imagen panorámica obtenida por *Google Street View*, como a la posición calculada de los satélites. Finalmente se calcula la visibilidad de cada satélite en una ruta trazada, sin tener en cuenta el efecto multicaminos ocasionado por la reflexión de las señales en las edificaciones (Bradbury, Ziebart, Cross, Boulton, & Read, 2007) y, para un caso específico en entorno urbano, se mostrará las diferencias al utilizar cada constelación y la ruta óptima creada a partir de las estimaciones realizadas.

1. Objetivos

Objetivo general

Diseñar e implementar un método para determinar la disponibilidad de posicionamiento satelital multiconstelación en la planificación de rutas en entornos urbanos.

Objetivos específicos

- a) Desarrollar e implementar algorítmica de posicionamiento multiconstelación para conocer las variables que intervienen en el posicionamiento con diferentes constelaciones.
- b) Desarrollar e implementar algorítmica de procesamiento e integración de imágenes cenitales de entornos urbanos para el cálculo de la disponibilidad de rutas.
- c) Diseñar método de evaluación y casos de uso en rutas urbanas para la conocer la fiabilidad de los resultados.
- d) Medir y evaluar el coste y desempeño de integración de los resultados del proyecto en sistemas de producción para conocer el alcance de implementación que puede tener este proyecto.

2. Generalidades

Obtener posicionamiento satelital por medio receptores GPS o multiconstelación, es una práctica que actualmente está siendo utilizada para el seguimiento de transporte, como parte de las investigaciones aplicadas a *SmartCities* (Al-Hader, Rodzi, Sharif, & Ahmad, 2009), o particularmente investigaciones sobre Sistemas de Transporte Inteligente (*ITS*) (Amini et al., 2014; Marais, Berbineau, & Heddebaut, 2005). Uno de los inconvenientes más comunes frente al seguimiento o rastreo de receptores satelitales, es la ausencia de disponibilidad de satélites en áreas urbanas densas (Cai & Gao, 2007). Esto se debe a que los edificios interfieren en la señal enviada por los satélites, ver Figura 1.

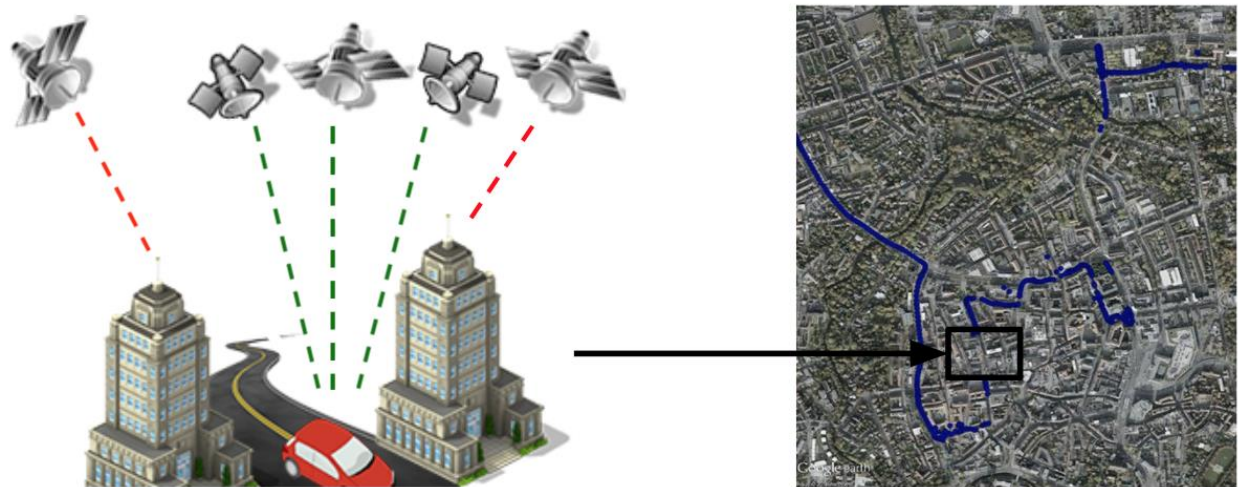


Figura 1. Obstrucción de la señal satelital en entornos urbanos. (Izquierda) Seguimiento GPS discontinuo (Derecha). Modificado: <https://goo.gl/VpZy7i>

2.1.Constelaciones

Frente al inconveniente de la obstrucción de la señal satelital en entornos urbanos, una de las soluciones más efectivas es hacer uso de múltiples constelaciones (Li et al., 2015). Las constelaciones son un conjunto de sistemas de navegación por satélite, como lo son: GPS, GLONASS, Galileo y Beidou, entre otras. Estos conjuntos de satélites son considerados un entorno multiconstelación (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008). Hoy en día, se cuenta con un uso generalizado de la constelación GPS (EE. UU.), que está conformada por más de 30 satélites¹; GLONASS (Rusia) está completamente desplegada y en operación con 27 satélites²; y las constelaciones Galileo (Europa) y Beidou (China), se encuentran parcialmente desplegadas, pero igualmente funcionales y, se espera que estén operativas en su totalidad en el año 2020³. Este trabajo de investigación tiene en cuenta solo dos constelaciones, la constelación GPS y GLONASS. Para estas constelaciones anteriormente nombradas, se debe tener en cuenta que hay características particulares en cada constelación que deben ser tenidas en cuenta al momento de realizar el cálculo de la posición y la evaluación de los resultados. Estas características se hacen evidentes en la disponibilidad satelital en entornos urbanos, (ver Tabla 1).

¹ <https://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus>

² <https://www.glonass-iac.ru/en/BEIDOU/index.php>

³ <https://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information>

Tabla 1. *Diferencia de las propiedades de las constelaciones GPS y GLONASS*

	GPS	GLONASS
Altitud	20200 kms	19100 kms
Periodo	11 hrs 56 min	11 hrs 15 min
Inclinación de planos orbitales	55°	64.8°
Planos orbitales	6	3
Satélites por plano	Hasta 6 satélites	Hasta 8 satélites

2.2. Cálculo de posicionamiento

La posición de los satélites puede ser calculada, teniendo en cuenta la cantidad variables que intervienen. Cada vez se abren nuevas posibilidades para un gran espectro de aplicaciones con calidades de servicio mejoradas, usando las señales combinadas de los satélites de distintas constelaciones como, correcciones a las frecuencias de emisión de los satélites (Adriana & Hernández, 2011; García Álvarez, 2008). Estas mejoras son necesarias y han sido la principal preocupación y motivo de investigación en diferentes sectores, pues existen variables que introducen retrasos en la emisión de la onda de los satélites, algunos de ellos son:

- **Perturbación ionosférica:** La ionosfera está formada por una capa de partículas cargadas eléctricamente que modifican la velocidad de las señales de radio que la atraviesan.
- **Fenómenos meteorológicos:** La troposfera es el más representativo de los fenómenos meteorológicos, el vapor de agua afecta a las señales electromagnéticas, disminuyendo su velocidad. Los errores generados son similares en magnitud a los causados por la ionosfera, pero su corrección es más compleja.
- **Imprecisión en los relojes:** Los relojes atómicos de los satélites presentan ligeras desviaciones a pesar de su cuidadoso ajuste y control; los relojes de los receptores son más económicos frente a los satélites, por lo cual presentan un mayor error. En un capítulo posterior se mostrará que hay un cálculo utilizado para disminuir el error en el reloj de los receptores.
- **Interferencias eléctricas imprevistas:** Las interferencias eléctricas pueden ocasionar correlaciones erróneas de los códigos pseudo-aleatorios o un redondeo inadecuado en el

cálculo de una órbita. Si el error es grande es más sencillo detectarlo con un receptor que reciba más de una señal por satélite, estas desviaciones causan errores de hasta un metro.

- **Error multicaminos:** Las señales transmitidas desde los satélites pueden sufrir reflexiones antes de alcanzar el receptor.
- **Topología receptor-satélites:** Una determinada configuración espacial puede aumentar o disminuir la precisión de las medidas.

Para ayudar a mitigar algunos de estos errores en tiempo real, existen los sistemas de aumentación terrestre (GBAS), basados en satélite (SBAS) o basados en aeronave (ABAS). Su funcionamiento consiste en enviar correcciones de los satélites de cada constelación que se encuentre en su rango. Estos sistemas de aumentación mejoran la precisión en tiempo real, pero no la disponibilidad en entornos urbanos, por este motivo no se tienen en cuenta en esta investigación. Otra influencia frente al error inducido al cálculo de la posición es la geometría de los satélites (Cai & Gao, 2007; Meneghini & Parente, 2017; Park, Kim, Lee, & Jee, 1996). Esta geometría hace referencia a la posición del satélite desde el punto de vista del receptor, en este caso se habla de la posición del satélite en coordenadas de azimuth y elevación, ver Figura 2. Aunque los satélites tienen un alcance global, debido a la rotación continua de la tierra, la descripción de las órbitas, la posición y la periodicidad de los satélites, algunos de estos no estarán dentro del rango de visión del receptor en algún momento del día, esto sin contar con las edificaciones presentes cerca al receptor de posicionamiento satelital.

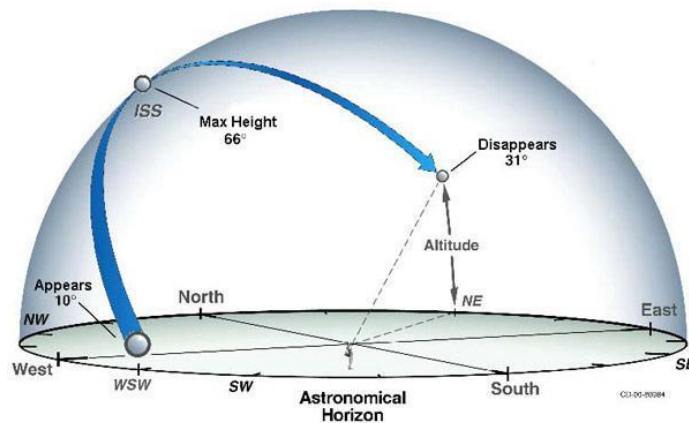


Figura 2. Relación de la posición del satélite frente al receptor. Tomado de <https://goo.gl/eM3pmd>

El posicionamiento de un receptor es calculado por señal emitida de los satélites que hacen parte de alguna constelación, los cuales, por medio de sus posiciones y la distancia calculada a partir de los tiempos de emisión de la señal, es posible trilaterar una posición con el receptor, es decir, calcular la posición del receptor a partir de la emisión de al menos 4 satélites disponibles (García Álvarez, 2008), ver Figura 3.

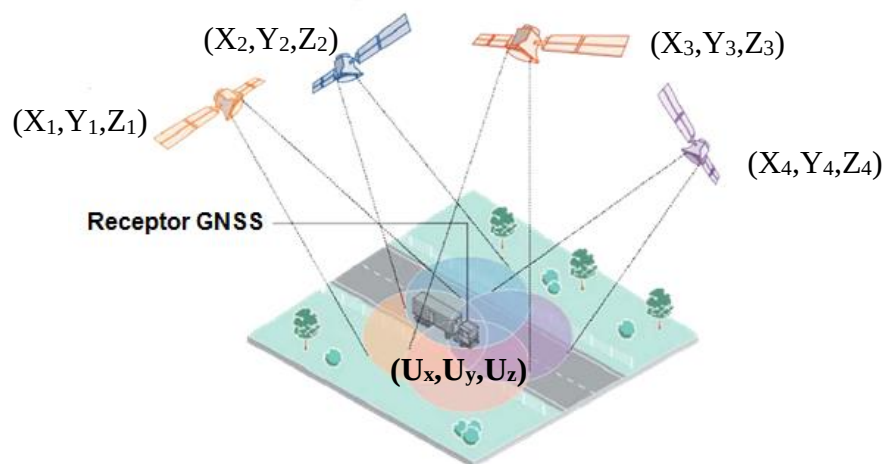


Figura 3. Vehículo con receptor de posicionamiento satelital, con observación de 4 satélites. Modificado de <https://goo.gl/rSY7DZ>

Para calcular entonces la posición del receptor, se necesita como parte de la ecuación, la posición del satélite y el reloj de este. Para conocer la posición de los satélites es necesario conocer el conjunto de parámetros orbitales que hacen parte de la constelación a utilizar. La distancia entre el satélite y el receptor se obtiene con el tiempo de la señal enviada por el satélite y el tiempo de la señal recibida por el receptor, teniendo en cuenta que dichas ondas de emisión viajan a la velocidad de la luz. Esto se reduce en resolver un sistema de ecuaciones, donde las incógnitas serán la posición del receptor y la sincronización del sistema, ver Ecuación 1.

$$\begin{aligned}\sqrt{(X_1 - U_x)^2 + (Y_1 - U_y)^2 + (Z_1 - U_z)^2} &= R_1 = R_{1(medida)} + c_\tau \\ \sqrt{(X_2 - U_x)^2 + (Y_2 - U_y)^2 + (Z_2 - U_z)^2} &= R_2 = R_{2(medida)} + c_\tau \\ \sqrt{(X_3 - U_x)^2 + (Y_3 - U_y)^2 + (Z_3 - U_z)^2} &= R_3 = R_{3(medida)} + c_\tau \\ \sqrt{(X_4 - U_x)^2 + (Y_4 - U_y)^2 + (Z_4 - U_z)^2} &= R_4 = R_{4(medida)} + c_\tau\end{aligned}$$

Ecuación 1. Cálculo de posición de receptor a partir de 4 satélites

En la Ecuación 1, se encuentran las variables de la posición del receptor las cuales se requieren hallar para el cálculo de la posición del receptor; estas corresponden a: U_x, U_y, U_z . Las variables conocidas son la posición de los satélites en un tiempo t , estas corresponden a: X_n, Y_n, Z_n . Donde n es el número del satélite que se encuentra dentro del rango del receptor. La parte izquierda de la ecuación se conoce como pseudorange o pseudodistancia, esta será la distancia entre el receptor y el satélite, teniendo en cuenta el error del reloj. Lo anterior se reduce a un cálculo de mínimos cuadrados para resolver el sistema y encontrar de esta manera la posición del receptor.

Hoy en día los receptores de bajo costo se encargan de hacer este cálculo según el número de satélites que tenga dentro del rango. La razón de tener el ajuste del reloj dentro de la ecuación es por la exactitud del reloj del receptor. Cada satélite independiente de su constelación tiene un reloj atómico y su precisión es significativamente alta, en comparación con cada reloj que puedan tener los receptores GPS. De tener un reloj atómico cada receptor aumentaría en gran manera el costo de los receptores. Por esta razón para encontrar esta diferencia que se presenta por el necesario bajo coste del reloj de los receptores, es necesario incluir mínimo un 4º satélite para incluir una cuarta variable a la ecuación, la cual sería la precisión del reloj.

2.3.Disponibilidad satelital en entornos urbanos

Encontrar la disponibilidad del cielo dentro de un entorno urbano, ha sido un tema de estudio para diferentes investigaciones (Souza, Mendes, & Rodrigues, 2003), donde utilizar una proyección estereográfica en un entorno urbano es útil para encontrar una gran cantidad de información con imágenes panorámicas; esto sucede porque en este tipo de proyección, la altitud de las edificaciones se espacian muy cerca unos de otros cerca del horizonte, y ampliamente espaciados más cerca del cenit. (Souza et al., 2003)

Se han realizado algunas investigaciones que requieran conocer el cielo disponible en un entorno urbano, para conocer la posición de los satélites frente a algún receptor (Suzuki & Kubo, 2015), sin embargo, este trabajo de investigación sugiere un método con miras de conocer las últimas técnicas utilizadas a la fecha para lograr una facilidad de uso con datos de libre acceso para calcular la disponibilidad satelital dentro de un entorno urbano, tanto en la parte del cálculo de la

posición satelital, como en la parte de encontrar las edificaciones que generan una indisponibilidad de la señal satelital. En esta investigación se utiliza la proyección estereográfica para posicionar los satélites desde el punto de vista del receptor, y la relación con imágenes panorámicas.

2.4. Proyección estereográfica

En los sistemas de defensa y control de tráfico aéreo en general, es comúnmente utilizado radares en una proyección estereográfica para mostrar los datos en los centros de operación (Burke, 1973). Para la representación de los satélites en un entorno urbano es necesario tener en común un plano de referencia, tanto para identificación de los puntos cardinales, como la representación de la altura de los edificios, o en general de elementos en un punto del mapa. Para esto se hace una conversión y transformación del rango de inclinación, es decir, datos de azimut y altura de coordenadas rectangulares en un plano radar con origen en el centro que representa un azimut de 90° . Esto puede apreciarse de mejor manera en la Figura 4, donde se debe proyectar cada punto de la imagen panorámica vista como una esfera y proyectarla hacia un plano que será el plano radial para tratar cada punto en función de *elevación* y *azimut*.

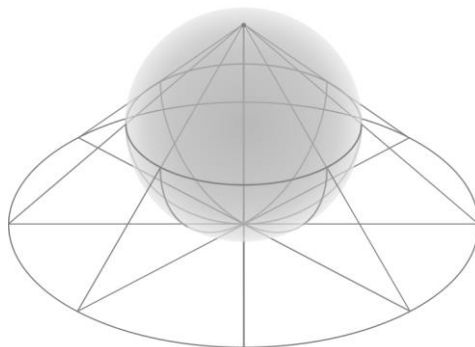


Figura 4. Proyección estereográfica de una imagen panorámica. Tomado de <https://goo.gl/U2VdJT>

Geoméricamente, un punto P de la esfera será proyectado sobre una superficie P' (Figura 5), $P = (x, y, z)$, y $P' = (X, Y, -\sigma)$. A continuación se describirán las ecuaciones para realizar esta proyección sobre una esfera de radio R , partiendo de los puntos de la esfera P y N . Para transformar las coordenadas se tiene en cuenta los triángulos $\triangle NPS$ y $\triangle NSP'$, estos son similares a:

$$\frac{PN}{NS} = \frac{NS}{P'N} \quad (2)$$

Entonces

$$\frac{x}{X} = \frac{PQ}{P'S} = \frac{PN}{P'N} = \frac{(NS)^2}{(P'N)^2} \quad (3)$$

Donde Q, es un punto cualquiera en NS. De esta manera se obtiene entonces la ecuación 4.

$$x = \frac{(NS)^2}{(P'N)^2} X \quad (4)$$

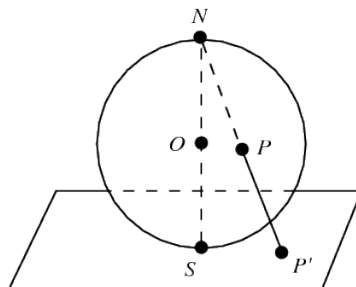


Figura 5. Proyección de un punto de una esfera sobre una superficie (proyección estereográfica). Tomado de <https://goo.gl/6GLqVR>

Se puede observar en la Figura 5, que $P'N$, es la hipotenusa de un triángulo rectángulo, entonces:

$$(P'N)^2 = X^2 + Y^2 + 4a^2 \quad (5)$$

De esta manera, se puede conocer que $NS = 2a$, entonces, se puede deducir x, y :

$$x = \frac{(4a)^2}{X^2 + Y^2 + 4a^2} X \quad (6)$$

$$y = \frac{(4a)^2}{X^2 + Y^2 + 4a^2} Y \quad (7)$$

Con esto se puede resolver la variable z , conociendo que $z^2 = a^2 - x^2 - y^2$, y usando las ecuaciones (6) y (7), se tiene entonces:

$$z = \frac{a(X^2 + Y^2 - 4a^2)}{X^2 + Y^2 + 4a^2} \quad (8)$$

En una proyección estereográfica, cualquier punto representado como cuerpo celestial se conecta primero al nadir en el centro, luego, la intersección de las líneas y el plano ecuatorial de la esfera, se proyectan hacia abajo para formar líneas de altitud solar en un plano proyectado bidimensional (Figura 6). De esta manera, cada línea de salida del sol a la puesta del sol se representa como un círculo con el diámetro aumentando a medida que se acerca el solsticio de invierno, es decir, ángulos de baja altitud. (Oh, Haberl, & Degelman, 2000). Estas Proyecciones de la posición de los satélites deben hacerse teniendo en cuenta la Figura 6, dónde se desean pasar de coordenadas X, Y, Z a coordenadas radiales (*Azimut y elevación*), la *elevación* será entonces conocida como la distancia desde el centro del plano radial o, geográficamente será el radio del plano. El *azimut* será el ángulo de la posición del satélite sincronizado con el norte de la posición de la imagen panorámica. Teniendo en cuenta que la imagen panorámica ya se encuentra proyectada, es necesario llevar las coordenadas de *Azimut y Elevación* del satélite al plano proyectado. La elevación será conocida como L (ecuación 9), y el *azimut* será entonces un punto x, y dentro del plano proyectado (ecuación 10).

$$L = R \tan \left[\frac{90^\circ - \alpha_s}{2} \right] \quad (9)$$

$$x = L \cdot \sin(\alpha_s); \quad y = L \cdot \cos(\alpha_s) \quad (10)$$

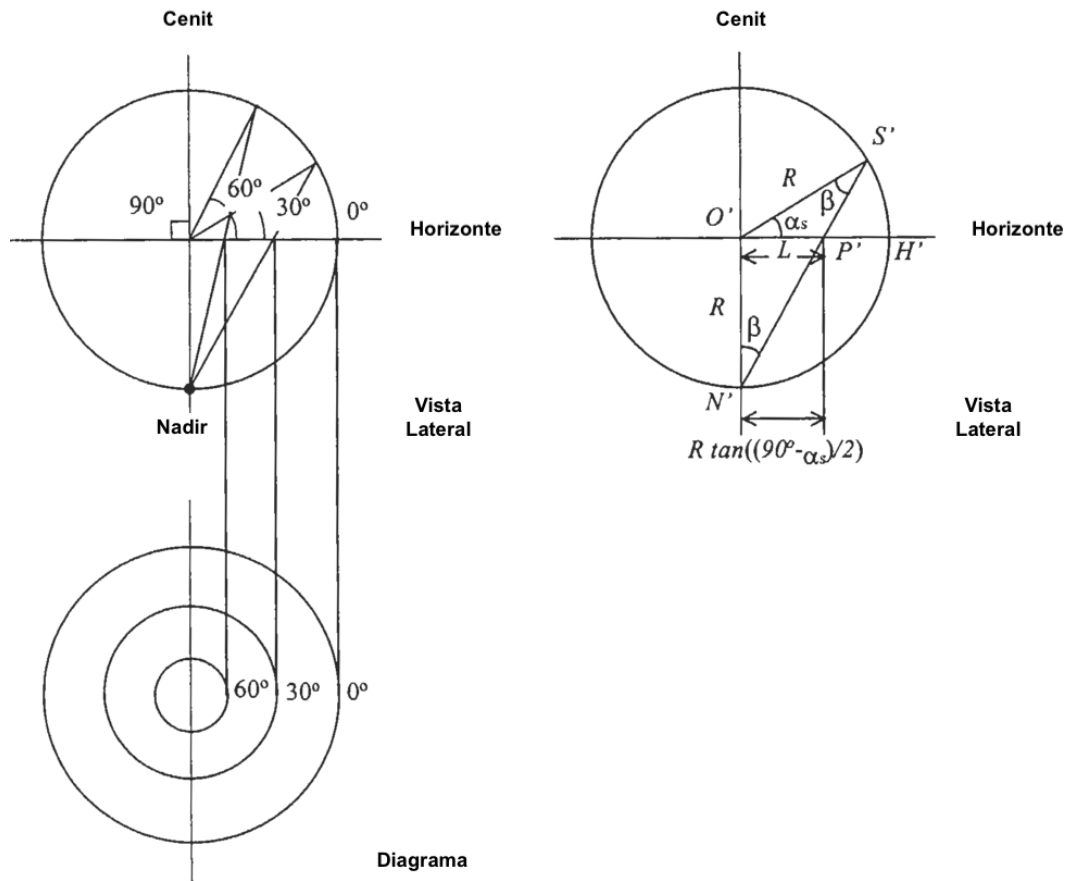


Figura 6. Proyección estereográfica y su representación en diagrama y vista lateral (Oh et al., 2000)

3. Método para planificación de rutas

Este trabajo de investigación sugiere un método para encontrar una ruta óptima que deberá tener un receptor en un entorno urbano con la constelación GPS y GLONASS. Para esto es necesario conocer la ruta en la cual se desea encontrar las edificaciones presentes, las cuales causarán los bloqueos de la señal, logrando pérdida de la disponibilidad por la cantidad de satélites mínimos requeridos dentro del rango de alcance del receptor para el cálculo de la posición; lo anterior, teniendo en cuenta la posición inicial de los satélites de las constelaciones para calcular la proyección de la posición en el tiempo requerido. El esquema general de este método se muestra en la Figura 7 y descrito posteriormente.



Figura 7. Método propuesto para planificar una ruta óptima con satélites disponibles en un entorno urbano.

3.1. Obtención de imágenes

Para lograr calcular la planificación de la ruta en un entorno urbano, es necesario contar con la disponibilidad de la información utilizada. Inicialmente es necesario contar con las imágenes que hacen parte del recorrido planificado, así como la descripción de las órbitas satelitales para calcular la posición que tendrán los satélites dentro del rango de visión en un determinado tiempo. Para obtener la información de las edificaciones presentes en la ruta, se utiliza la librería de *Google Street View*, es decir, las fotografías panorámicas o de 360° en algún punto de la ciudad. Para obtener los datos referentes a la ruta se utiliza *Google Maps*. Los datos que se pueden adquirir gracias a la librería son: La dirección de la ruta, el tiempo promedio de transcurso en vehículo y el número de identificación de la imagen panorámica. La imagen panorámica será tomada según las indicaciones de posición en *Google Maps*, ver Figura 8. Por ejemplo, la Figura 9 muestra la imagen panorámica tomada según las coordenadas: Longitud: 40.7286916, latitud: 73.1172572.

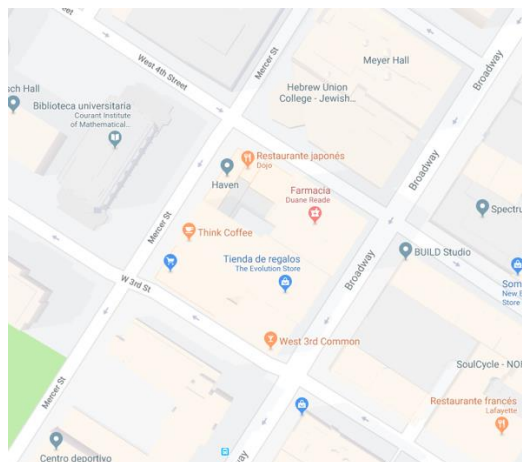


Figura 8. Mapa con rutas disponibles por *Google Maps*.



Figura 9. Imagen panorámica dada por *Google Street View*. Lon: 40.7286916, lat: 73.1172572

Como se ve en la Figura 9, esta imagen tiene información del cielo disponible, aunque debe tenerse en cuenta que varía según las condiciones climáticas o la hora en las cuales fueron tomadas. Esta imagen panorámica deberá modificarse en un tipo de proyección para estar en las mismas coordenadas que puedan ubicarse para los satélites luego de calcularse su posición en relación de elevación y azimut dentro de un plano radial.

3.2.Posición satelital

Junto con la información de la imagen tratado en el capítulo anterior, es necesario conocer la posición de cada satélite perteneciente a la constelación GPS y GLONASS. Para acceder a estos datos se puede optar por dos tipos de formatos: El formato TLE (*Two-line Element*) y el formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) (Pérez & Binders, 2003). El formato RINEX para la constelación GPS, contiene la información del conjunto de parámetros orbitales que indican la posición del satélite respecto a la tierra, parámetros como: semi-eje mayor, excentricidad,

inclinación del eje, entre otros. Estos parámetros se utilizan para el cálculo de la posición por la ley de Kepler del movimiento planetario (Lu, Su, Wang, & Lu, 2017), en el caso de GLONASS, el formato RINEX contiene la información de posición, velocidad y aceleración dentro de un plano cartesiano, en este caso no es posible utilizar la ley de Kepler. Para hacer un cálculo de la posición es necesario utilizar un algoritmo de Runge-kutta. Por otra parte, existe el formato TLE (Two-line elements set) el cual contiene la descripción de la órbita para todas las constelaciones. Dependiendo la constelación que se quiera investigar, hay variables que deben tenerse en cuenta, como la corrección a la posición dada por el satélite y la unificación del formato. Para esta investigación se ha utilizado el algoritmo SPG4 programada en una librería Python⁴. Actualmente la agencia aeroespacial de los estados unidos tiene a disponibilidad pública el algoritmo en pseudocódigo y las ecuaciones implementadas en FORTRAN (Hoots & Roehrich, 1980). En el formato TLE, todas las constelaciones tienen una misma forma de representación de los datos, a diferencia del formato RINEX. En la Figura 10, se hace una comparación del cálculo de la posición leída con un archivo RINEX y la proyección de la posición de uno de los satélites GPS con un archivo TLE. Lo anterior, es necesario para comparar el posicionamiento dado por el archivo RINEX frente al cálculo de la posición con el formato TLE. En la Figura 10 se puede notar que el mayor error se presenta en los menores ángulos respecto al horizonte, pues la geometría de la posición del satélite influye en el cálculo de la posición de este (Biljecki et al., 2016). Sin embargo, la exactitud de esta posición solo podría promediarse, pues depende del día en que se requiera el cálculo de la posición, la constelación, el número de vehículo satelital, entre otros.

⁴ <http://rhodesmill.org/pyephem/>

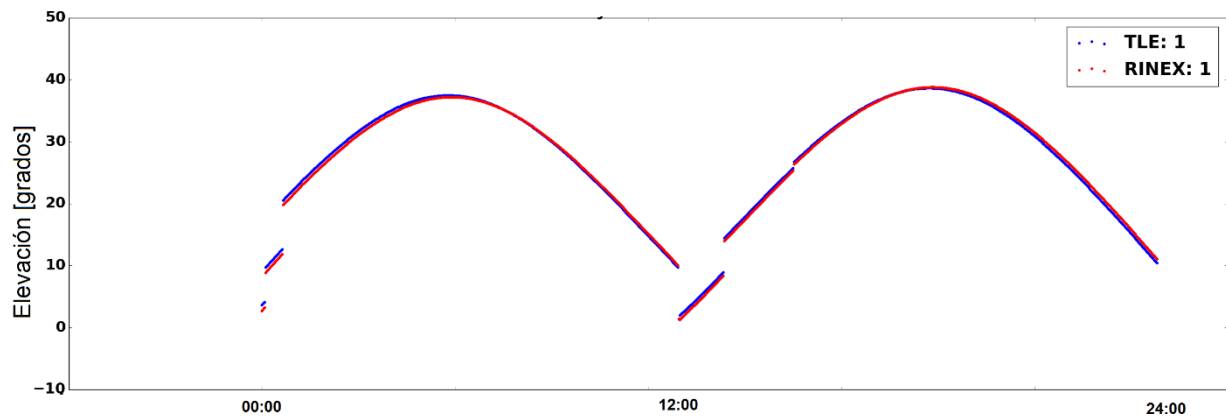


Figura 10. Diferencia de elevación desde un receptor fijo, calculada con archivo RINEX del día (rojo), y elevación del satélite calculado un día antes con archivos TLE (azul). Comparando en las observaciones del día de uno de los satélites GPS.

Esta diferencia en el cálculo de la elevación del satélite va en aumento según la cantidad de días posteriores que se quiera calcular, es decir, la extrapolación de la posición. En la Figura 11 se puede notar la diferencia entre 1 a 110 días, lo cual muestra un mayor error de extrapolación entre más días de diferencia se requiera hacer el cálculo de la posición del satélite. Lo anterior teniendo en cuenta que el resultado difiere según el satélite del cual se quiere calcular, pues una vez más, la geometría influye en el error. Para realizar esta gráfica se toman los archivos RINEX de días anteriores, ya que solo se puede acceder a ellos pasado el día, es decir, los datos del 17 de noviembre están disponibles el 18 de noviembre. Por lo tanto, la diferencia se hace días hacia atrás, haciendo el cálculo de la posición de todo un día de cada satélite, tomando el mayor error encontrado en el día frente a la posición calculada con el archivo TLE de un mismo día. Esto permite ver el comportamiento a través de los días anteriores, o bien, posteriores.

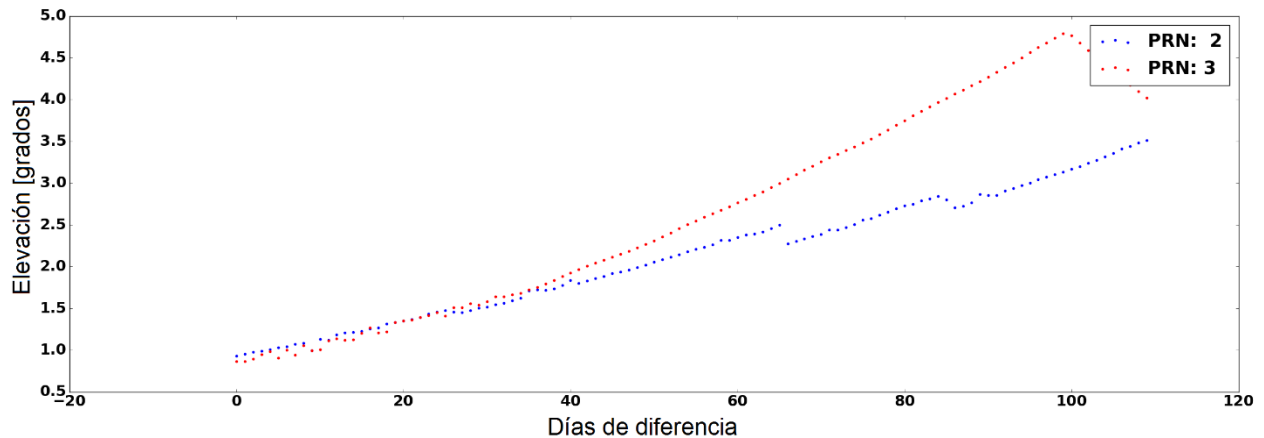


Figura 11. Diferencia de máximo error calculado con archivos TLE, frente a la posición leída de los archivos RINEX durante 110 días. se muestran dos satélites proyectados de la constelación GPS.

3.3. Segmentación de imágenes

Para lograr tener una segmentación semántica de cada edificación en un entorno urbano es comúnmente utilizado los objetos CityGML. Estos objetos contienen figuras geométricas en un lenguaje de marcado describiendo las edificaciones presentes en una ciudad. Estos objetos 3D son bastante precisos en su mayoría, dependiendo del nivel de detalle (Burke, 1973), y pueden encontrarse errores en su geometría, tanto en las bases de datos públicas como privadas (Oh et al., 2000). Esta investigación propone hacer uso de fotografías panorámicas en vez de objetos CityGML, para esto se utilizará la librería *Google Street View*, con la cual se logra tener una imagen panorámica o fotografía 360 grados en un punto de la ciudad, y con esto conocer la disponibilidad del cielo en un entorno urbano. Este cielo disponible es para ubicar la trayectoria de los satélites y con esto conocer si la señal de los satélites llegará a los receptores o será bloqueada por las edificaciones. Cualquier punto en el espacio se representa a partir del centro del nadir, luego, la intersección de las líneas y el plano ecuatorial de la esfera se proyectan hacia abajo

para formar líneas de altitud solar en un plano proyectado (Souza et al., 2003)(Chen, Papandreou, Kokkinos, Murphy, & Yuille, 2014), ver Figura 12. La proyección estereográfica tiene la ventaja de reducir el error al borde de la trayectoria, pues los ángulos en el horizonte son más amplios, y permite proyectar el entorno urbano en un plano bidimensional (Badrinarayanan, Kendall, & Cipolla, 2017).

El siguiente paso en el método es usar un algoritmo de segmentación semántico para diferenciar el cielo de la obstrucción de los edificios. Para este proceso se ha utilizado la librería *Segnet*. Esta librería es el resultado de un estudio realizado por la universidad de Cambridge, donde cada objeto dentro de una imagen es etiquetado: edificios, autos, personas, entre otras (Badrinarayanan et al., 2017). *Segnet* consiste en una red de codificador y una red decodificadora correspondiente, seguida de una capa final de clasificación pixel a pixel. Cada codificador consiste en una o más capas convolucionales con normalización de lotes (Greene & Zee, 2009). Las obstrucciones de los edificios se pueden diferenciar, ya que la posición proyectada de los satélites pertenece a la clase correspondiente a la segmentación. (Figura 13). La librería de *Segnet*, con un *dataset* de entrenamiento de 3.5K sobre 140K, puede lograr un promedio de precisión de 90.4%, siendo los datos menos precisos: postes de luz 32.1% y bicicletas con 36.5, y una mayor precisión en las carreteras con 96.4 y el cielo con 96.1%. sin embargo, este valor de precisión cambiará dependiendo del entrenamiento, de la muestra, de la calidad de la imagen dada por *Google Street View* según el API que se pueda acceder, entre otros.

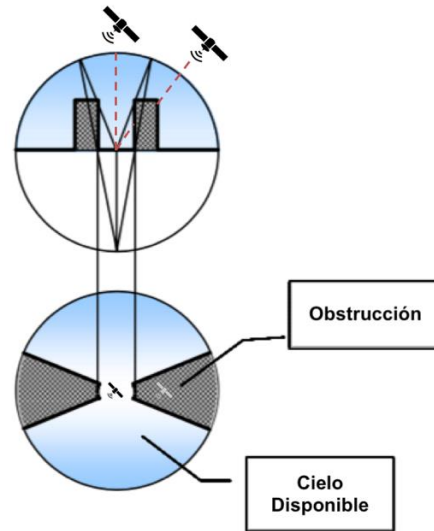


Figura 12. Obstrucción de la señal satelital con la proyección estereográfica a partir de *Google Street View* e identificación de los edificios con la segmentación del cielo disponible. Modificado de <https://goo.gl/T95KFZ>

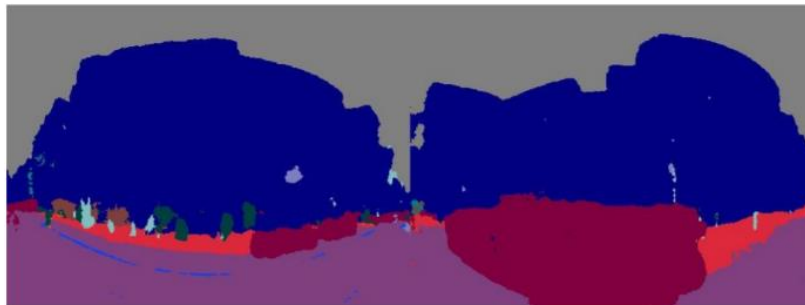


Figura 13. Segmentación semántica de imagen panorámica tomada de un punto de la ciudad dentro de la ruta seleccionada.

3.4. Proyección de la posición satelital

En la tarea de conocer la disponibilidad de los satélites se ha utilizado un modelo matemático que calcule en cierto momento y lugar, la posición en azimuth y elevación del satélite, con referencia a

la posición del observador o receptor; esta posición debe ser adaptada a la proyección estereográfica. Conociendo los valores de la efemérides o descripción de la órbita de cada satélite es posible utilizar la ley de Kepler para conocer la posición de un satélite en un momento dado (Lee, 2002), sin embargo, se han hecho algunas adiciones a la ley de Kepler para obtener un mejor cálculo en la proyección de la posición. Existen cinco modelos matemáticos para la estimación de la posición y velocidad del satélite que están disponibles y son aprobados por el departamento de defensa de los estados unidos (*DoD*). Los modelos son SGP, SGP4, SDP4, SGP8 y SDP8 (Dong & Chang-yin, 2010). El formato de lectura utilizado para estos modelos es el *Two-Line Element Sets* (TLEs) (Ahmed Magdy, Inal A., Bakry A., & Mervat A., 2014). Para este trabajo de investigación se ha utilizado el modelo de propagación simplificado SGP4 (*Simplified Perturbations Model*) dadas las necesidades de los requerimientos. Las ecuaciones fueron desarrolladas inicialmente por Ken Cranford en 1970 y han sido mejoradas con el tiempo (International GNSS Service & RINEX Working Group and Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee, 2013), ver APENDICE A. Estas ecuaciones modelan los efectos gravitacionales de la luna y el sol, así como ciertos campos gravitacionales terrestres, que son de particular importancia para periodos orbitales. Los otros modelos matemáticos existentes se usan dependiendo de las perturbaciones por las cuales son afectadas, cercanas o lejanas como el caso del modelo SDP4 (*deep-space perturbations*). Para calcular la posición de un satélite, se debe tener en cuenta que no solo basta un buen modelo predictivo; los datos para el cálculo deben ser constantemente refinados debido a las perturbaciones que presentan en los satélites, perturbaciones gravitacionales y no gravitacionales (International GNSS Service & RINEX Working Group and Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee, 2013). NORAD (*North American Aerospace Defense Command*) se encarga de generar constantes

correcciones a los satélites, eliminando las variaciones periódicas en la información y de esta manera mejorar la posición del satélite calculado. Lo anterior, sin modificar el modelo de cálculo, con lo cual se logra una mayor precisión al refinar la información dados los elementos de perturbación general. La disponibilidad satelital finalmente se ve evidenciada cuando en un punto de la zona urbana, se elige una imagen panorámica segmentada y se realiza una proyección estereográfica; y con la posición calculada de los satélites, se tienen en cuenta los satélites que se encuentran en la parte disponible del cielo. En la Figura 14, los puntos rojos corresponden a la constelación GPS y los puntos amarillos corresponden a la constelación GLONASS, y la parte oscura son los edificios y obstáculos en general en ese punto de la ciudad. Se observa entonces, que muchos de los satélites no son tenidos en cuenta ya que su señal será obstruida o bloqueada, dada la representación que se da en el resultado.



Figura 14. Representación de la posición de los satélites en un punto de la ciudad con edificios presentes.

En un caso en el cual se requiera una disponibilidad óptima, se realiza una observación durante un día en una ubicación dentro de la zona urbana, en el cual se requiere un mínimo de 4 satélites para lograr posicionamiento del receptor. En la Figura 15 se puede notar la rotación de los satélites

a través de sus órbitas y cómo generan una variación en la disponibilidad de satélites del receptor sin mover su ubicación. También se puede notar la diferencia entre usar un receptor GNSS, comparado con un receptor de constelaciones GPS y GLONASS por separado, la línea roja discontinua es el mínimo de satélites necesarios para que se logre calcular un posicionamiento por parte del receptor. En este caso, un receptor GPS tiene una pérdida de la recepción de señal mayor, en contraste con un receptor GNSS que recibe señales GPS y GLONASS. (Figura 16).

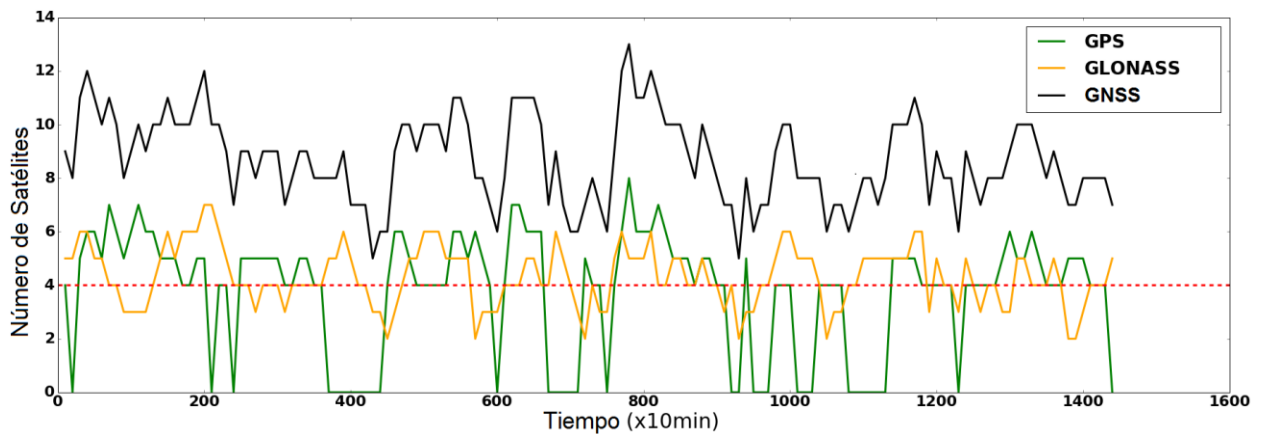


Figura 15. Cambio de la disponibilidad de satélites en un día (1440 minutos) para un punto de la ciudad, dónde el límite para lograr la trilateración es 4, y se separa la constelación GPS, GLONASS, y la suma de los satélites encontrados en ese momento.

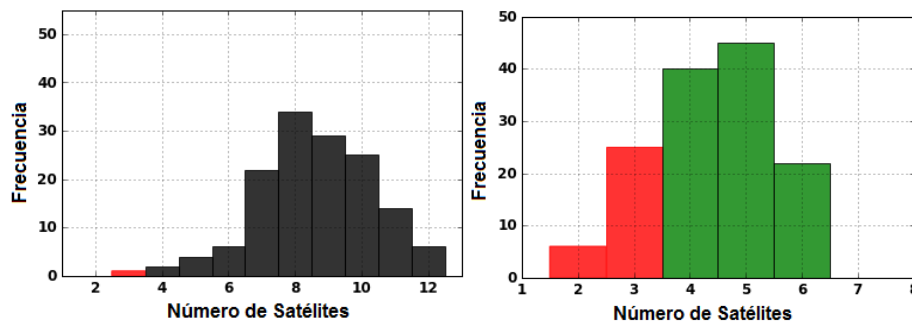


Figura 16. Histograma de disponibilidad de satélites en un día: (izquierda) Teniendo en cuenta la constelación GPS y GLONASS. (derecha) teniendo en cuenta la constelación GPS. En ambas gráficas la cantidad de satélites inferiores a 4 se representan en color rojo.

3.5. Planificación de rutas óptimas con disponibilidad satelital en entornos urbanos.

Acorde con el propósito de la investigación, es necesario encontrar la planificación de la ruta óptima en un entorno urbano, es decir, el mejor horario de partida para el seguimiento de un receptor en una ruta dentro de un entorno urbano o bien, con un solo horario de partida posible, la mejor ruta a tomar desde un punto de partida a uno de llegada. La ruta óptima será dónde la pérdida del seguimiento por posición satelital a través de la ruta sea mínima.

El primer paso del método (ver Figura 7), es elegir una fecha y hora de partida del vehículo con receptor GNSS, y la ruta la cual realizará. Gracias a la herramienta *Google Maps*, es posible obtener el tiempo promedio de transcurso de la ruta. Para este ejemplo se establece una ciudad de edificios altos, en este caso, la ciudad de Nueva York. (ver Figura 17)



Figura 17. Ruta establecida en la ciudad de Nueva York para recorrido del vehículo con seguimiento de posición satelital, desde Mercer Street con West 4th Street, hasta Thompson Street con Bleecker Street.

Seguido a esto, se debe calcular la cantidad de satélites que estarán disponibles en la ruta establecida. Lo anterior se resume en realizar la segmentación semántica con *Segnet*, para diferenciar los edificios del cielo disponible, con las imágenes obtenidas por *Google Street View* a través de la ruta. Esto permitirá determinar la disponibilidad de los satélites en el momento calculado dentro de su órbita y la ubicación de estos en la proyección estereográfica. Este proceso debe realizarse dentro de la ruta predefinida, donde luego de realizar la segmentación a la imagen panorámica, se realiza la proyección estereográfica y la conversión de las coordenadas de elevación y azimut de la posición de los satélites calculados. Con *Google Street View* se puede obtener la imagen panorámica de una ruta cada 10 pies⁵. ver Figura 18.

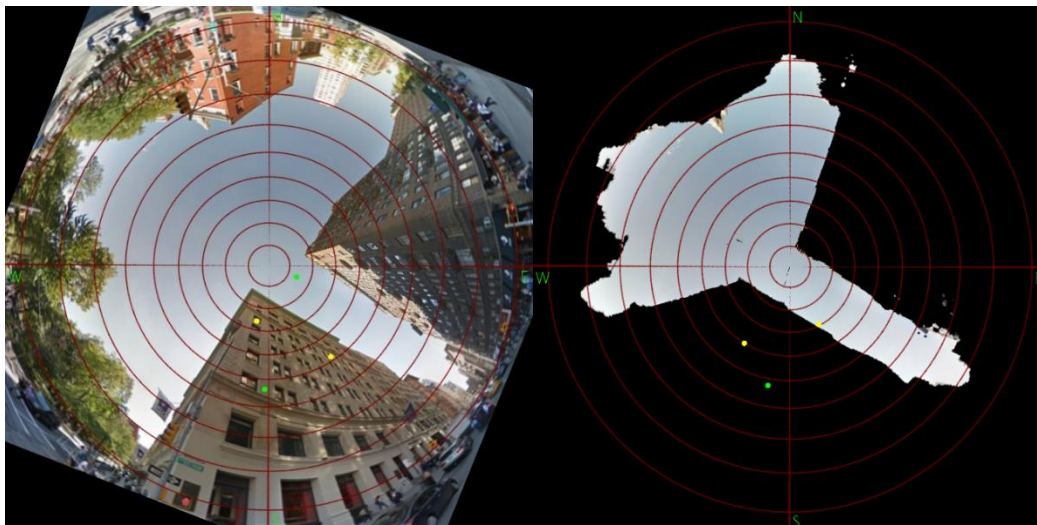


Figura 18. Satélites ubicados en una proyección estereográfica con coordenadas de elevación y azimut. (izquierda) Imagen no segmentada, (derecha) Imagen segmentada.

Al realizar este proceso a través de toda la ruta seleccionada en el entorno urbano, se tiene una gráfica a través de la ruta en una hora de partida, que indica la cantidad de satélites disponibles por

⁵ <https://enterprise.google.com/intl/es-419/maps/products/mapsapi.html>

cada imagen panorámica recibida. De esta manera a través de una ruta se puede conocer la cantidad de satélites disponibles en cada punto, teniendo en cuenta el número mínimo de satélites disponibles para realizar un cálculo de posicionamiento y la diferencia de disponer de una sola constelación (GPS o GLONASS) o de tener las dos constelaciones disponibles, ver Figura 19.

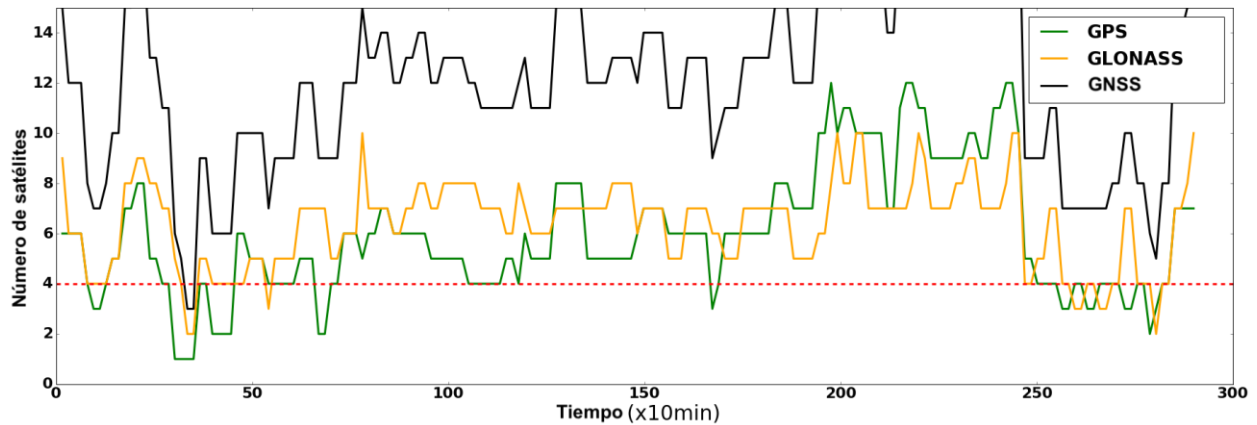


Figura 19. Satélites disponibles dentro de una ruta. El eje X corresponde a la distancia de la ruta representado en el tiempo que toma en recorrer la ruta, y el eje Y corresponde a la cantidad de satélites disponibles en un momento.

Este proceso se repite para una distinta hora de partida, teniendo en cuenta que en cada segundo puede variar las posiciones en una ruta. Se selecciona entonces un rango de tiempo de partida del vehículo con el receptor, para ver la disponibilidad de satélites que tendrá durante ese rango de tiempo. En la Figura 20, se puede notar la ruta seleccionada, calculando la disponibilidad de satélites cada 2 segundos, con solo la constelación GPS, donde el eje X corresponde a la ruta marcada en *Google Maps*, es decir, desde *Mercer Street* con *West 4th Street*, hasta *Thompson Street* con *Bleecker Street* en un sentido de la calle, y el eje Y es cada hora de partida iniciando a las 12:00 y con una variación de cada dos segundos hasta llegar a las 12:05. Este rango es tomado, luego de ver toda la gráfica del día y se muestra el interés por una zona en particular por su

comportamiento, o bien en el caso real, dependiendo del rango de disponibilidad que tenga el vehículo. Esto permite ver que, a pesar de que es poco tiempo entre cada recorrido calculado, es notorio la rotación de los satélites. En esta gráfica los espacios en blanco muestran que en esa parte de la ruta se encontrarán 3 satélites o menos, las gráficas distintas a las zonas blancas, es la cantidad de satélites suficientes para lograr hacer un cálculo de la posición en ese punto de la ruta. Los colores solamente son utilizados para diferenciar cada una de las posibles rutas, ya que este tipo de gráfica (Joyplot⁶) se superponen las imágenes entre ellas.

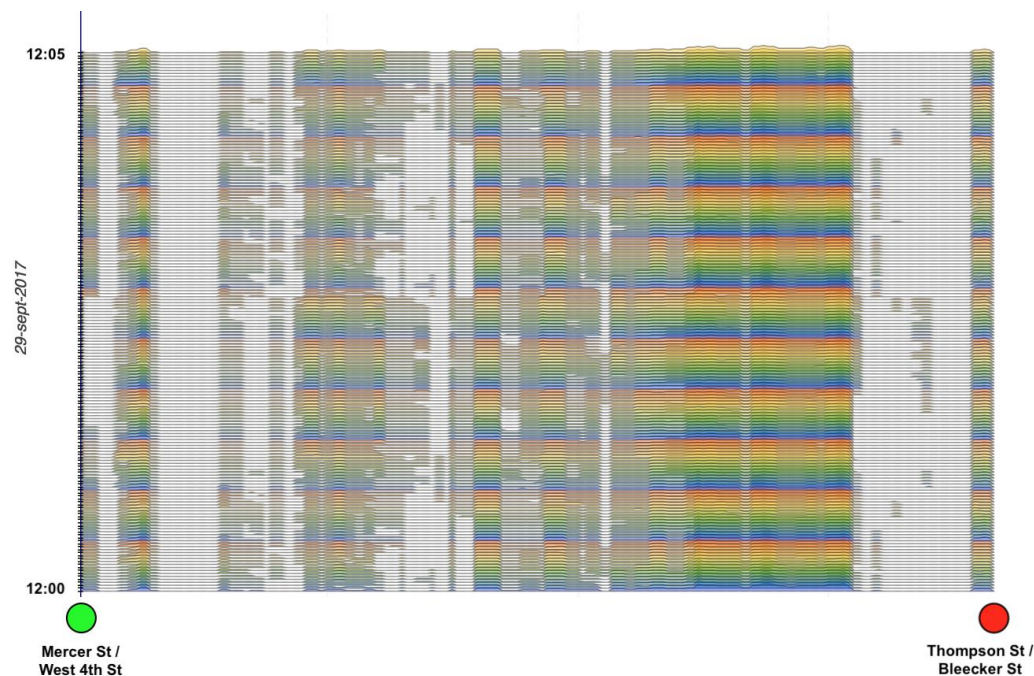


Figura 20. Posibles rutas cada 2 segundos con constelación GPS. Eje X pertenece a la ruta establecida, y el eje Y pertenece a la cantidad de satélites disponibles por ruta e igualmente la cantidad de rutas que inician a distinta hora.

⁶ <http://blog.revolutionanalytics.com/2017/07/joyplots.html>

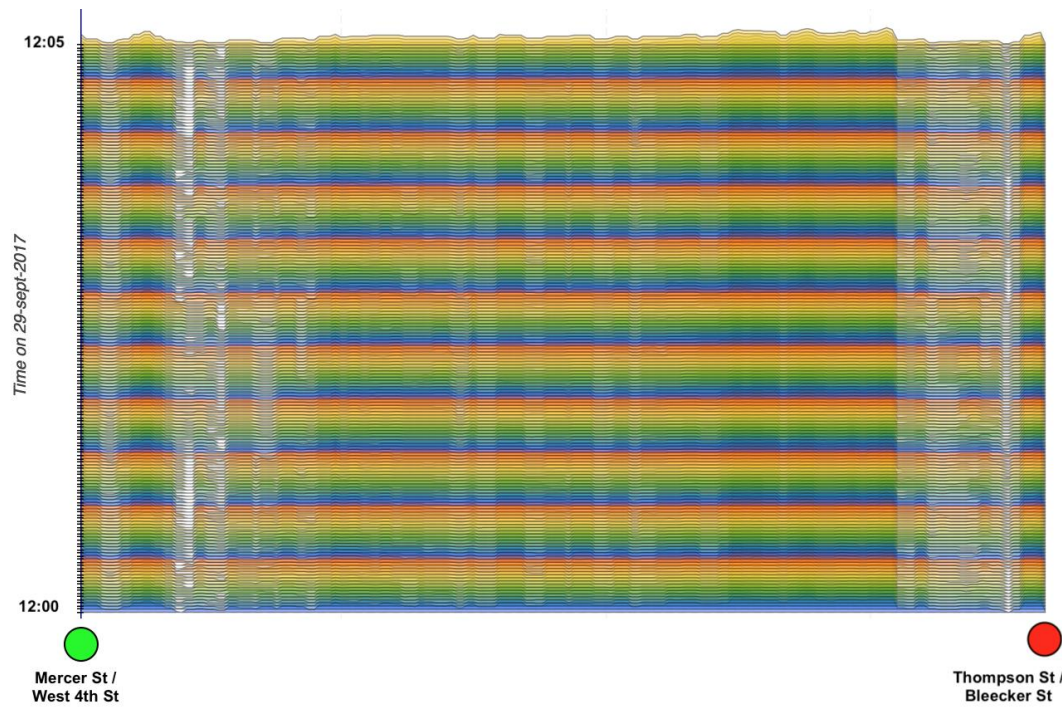


Figura 21. Posibles rutas generadas cada 2 segundos con constelaciones GPS y GLONASS al tiempo.

Utilizando los mismos datos de la Figura 20, se realiza una búsqueda de disponibilidad de satélites, pero con más una constelación, en este caso GPS y GLONASS juntos. En la Figura 21 puede notarse la evidente mejora de tener multiconstelación disponible, pues en solo unas partes de la ruta se evidencia esta ausencia de disponibilidad de satélites. Ya que esta no se aprecia de manera clara las gráficas, se selecciona un rango aún más corto, para ver la variación de la disponibilidad, esto puede notarse en la Figura 22. Donde el periodo analizado es de solo 30 segundos, que igualmente puede notarse una variación, aunque esta vez muy pequeña, ya que la periodicidad de los satélites no es tan rápida.

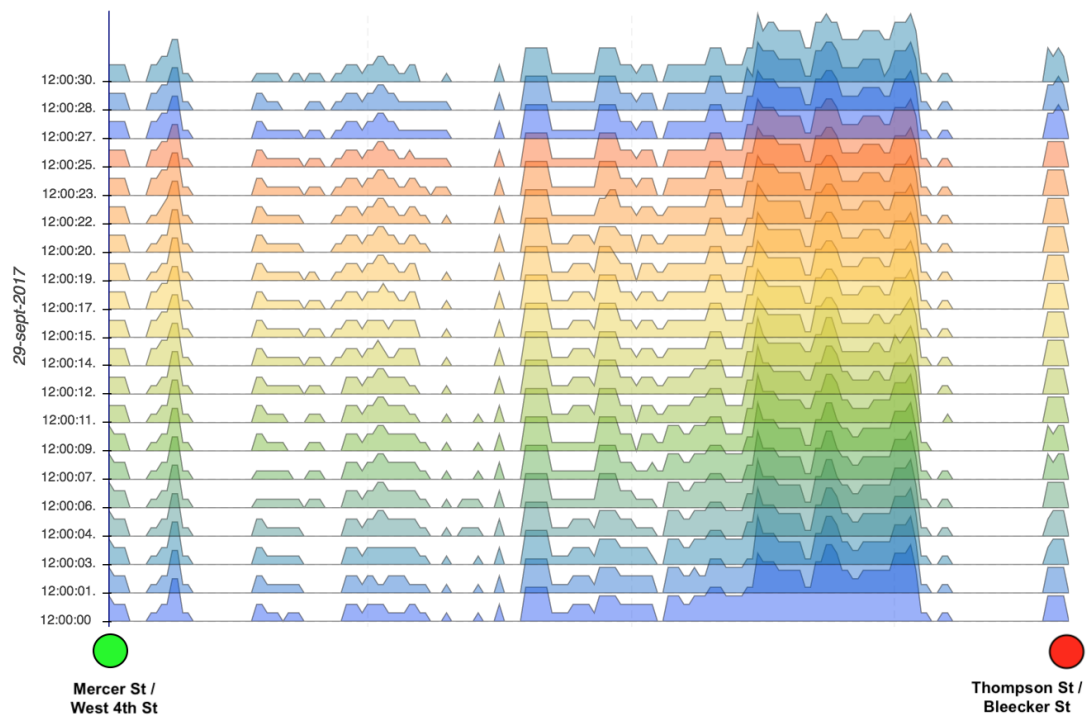


Figura 22. Segmento de rutas posibles para con constelación GPS cada 2 segundos.

Si bien, es poco probable lograr por medio del tráfico común, tener la intención de esperar un par de segundos para encontrar suficiente disponibilidad de satélites en algún punto de la ciudad; este ejercicio muestra a manera de investigación que aún en unos segundos puede cambiar la disponibilidad mínima de satélites requeridos en un punto de la ciudad, ya que depende de la rotación de satélites en distintas orbitas y la obstrucción implícita en la ciudad. Para realizar la gráfica a través de toda la ruta, se utilizan los tiempos otorgados por la aplicación de *Google Maps*; esto lo hace por medio de la adquisición de los datos que tiene de las rutas por las cuales se han transitado anteriormente. Según está información del tránsito por la ruta, en este caso, los datos de *Google Maps*, sugieren que el tiempo estimado en la hora de la prueba (12:00 del 29 de septiembre), tomará 4 minutos y 50 segundos.

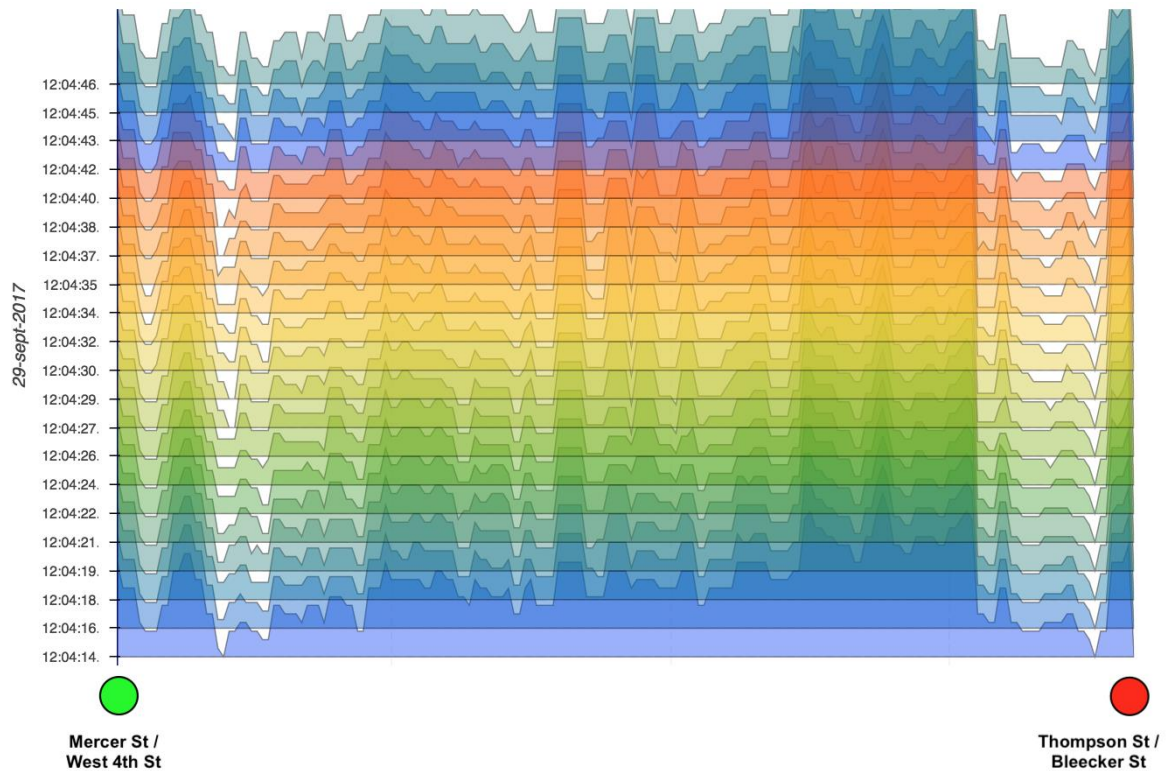


Figura 23. Segmento de rutas posibles para con constelación GPS y GLONASS cada 2 segundos

Finalmente, en la Figura 23 se puede ver una vez más la ventaja de utilizar multiconstelación para tener una mayor disponibilidad de satélites y, por consiguiente, disminuir la posibilidad de perder un monitoreo por posicionamiento satelital. En esta figura solo se encuentran ciertos puntos en los cuales en los que aún con multiconstelación es muy probable que siempre se logre tener un posicionamiento satelital.

4. Validación del método propuesto

Para validar el método propuesto, Se analizan no sólo distintas horas de partida como se nota en el capítulo anterior. A demás se analizan las distintas rutas permitidas para llegar de un punto de partida a un punto de llegada obteniendo el menor número satélites disponibles dentro de una ruta. Se analizarán distintas rutas para encontrar la diferencia en estas y analizadas todas a una misma hora hipotética de partida.

4.1. Dos rutas cortas

Se utiliza una ruta corta para revisar al detalle cada parte analizada por el método y que tienen elementos suficientes para un análisis esto siguiendo los pasos descritos en el capítulo anterior. Este ejemplo puntual se hará en la ciudad de Nueva York entre 696 Broadway a 10W 3rd St. Ver Figura 24.

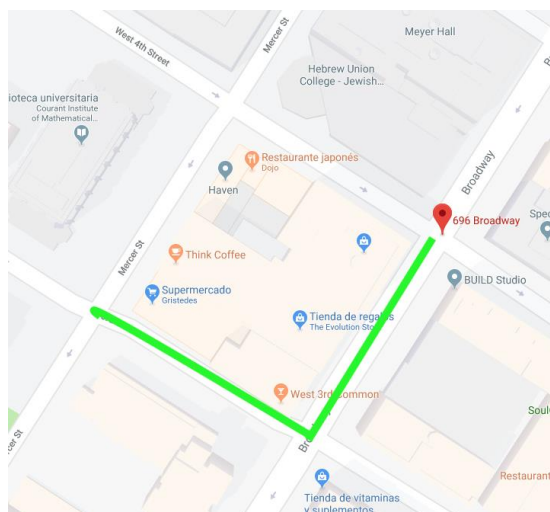


Figura 24. Ruta validación (246 Mercer St, New York, NY 10012, y 696 Broadway, New York, NY 10003, EE. UU.)

Esta ruta tiene elementos que pueden ayudar a validar el método respecto a los elementos presentes. Inicialmente es un entorno urbano, que tiene edificaciones de distintas alturas, esquinas para validar que tendrán menos obstáculos presentes, y zonas arboladas para revisar el algoritmo de segmentación semántica. Ver Figura 25.

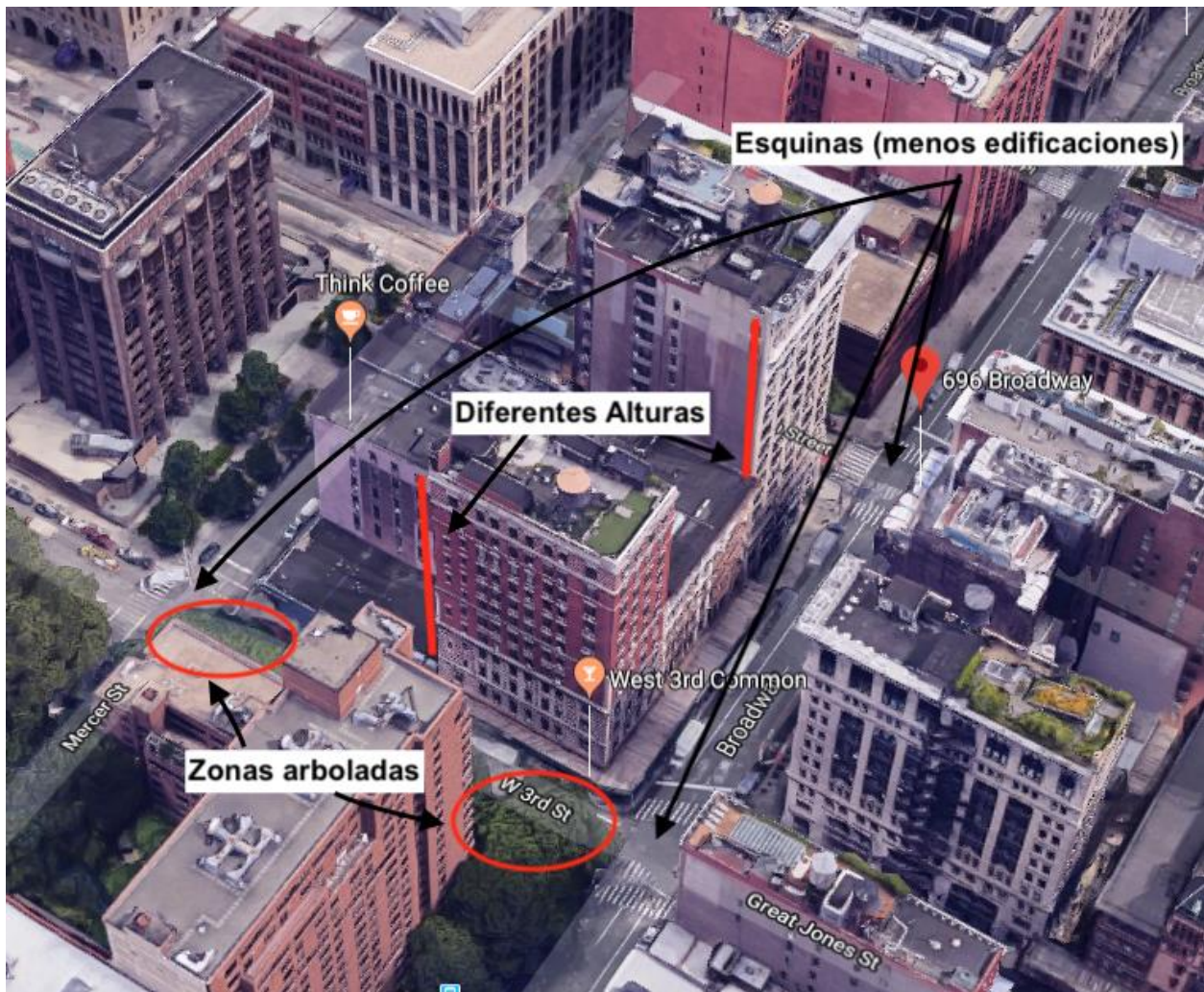


Figura 25. Ruta de validación con diferentes obstáculos presentes.

Teniendo en cuenta que las constelaciones pertenecen a distintos países como GPS de EEUU o GLONASS de Rusia, se ha dejado claro en un capítulo anterior que todos tienen un alcance global,

por este motivo dependerá de la rotación de los satélites y no de un punto en específico para validar su posición, se hacen pruebas en la ciudad de Nueva York por la cantidad de edificaciones presentes, mas no porque pertenezca a EEUU o exista una prioridad de la disponibilidad por parte de la constelación GPS.

Para este caso se realizan los cálculos de la disponibilidad de satélites en la misma ruta marcada en la Figura 24, pero en tiempos de partida diferentes. Cada gráfica de la ruta inicia a diferente hora del día mostrando un rango de posibilidad de partida (eje Y). Como se ve en la Figura 26, Las zonas grises dentro de la gráfica indica el paso por una esquina o cruce entre calles. En esta zona se puede notar que la disponibilidad de satélites en ese momento es mayor, ya que en los cruces de las calles se encuentran menos obstrucciones o menor presencia de edificios. La zona sombreada en rojo indica áreas críticas dentro del recorrido, es decir, muy poca visibilidad de satélites o directamente inferior a los mínimos requeridos, y esto se puede comparar con la Figura 25, pues se encuentran los dos edificios más altos en esa zona. La parte de la gráfica restante es el resultado de la variación algunos edificios altos junto con la rotación en la posición de los satélites en ese momento. La línea de color rojo es el recorrido sugerido del vehículo o receptor satelital a través de la ruta planteada. Si el vehículo se encuentra en un área crítica, la posición vertical de esta línea roja, indica una opción óptima la cual sugiere la espera en el mismo lugar hasta obtener una mejor disponibilidad de satélites o bien se puede elegir una hora de partida distinta, la cual sea óptima. La gráfica muestra el tiempo necesario a esperar en la ruta según la hora de partida, en este caso a manera de ejemplo, sugiere una espera de 16 segundos.

Aunque en la zona siguiente a la segunda esquina, se espera un mejor resultado del mostrado, es decir, aunque si bien no hay pérdida de posicionamiento o suficientes satélites para obtener posicionamiento en ese momento, como se ve en la Figura 18 la segmentación toma como

obstrucción las zonas arboladas. Este es el resultado de la planificación de la ruta calculada con imágenes panorámicas tomadas de *Google Street View* con segmentación semántica dentro de un entorno urbano.

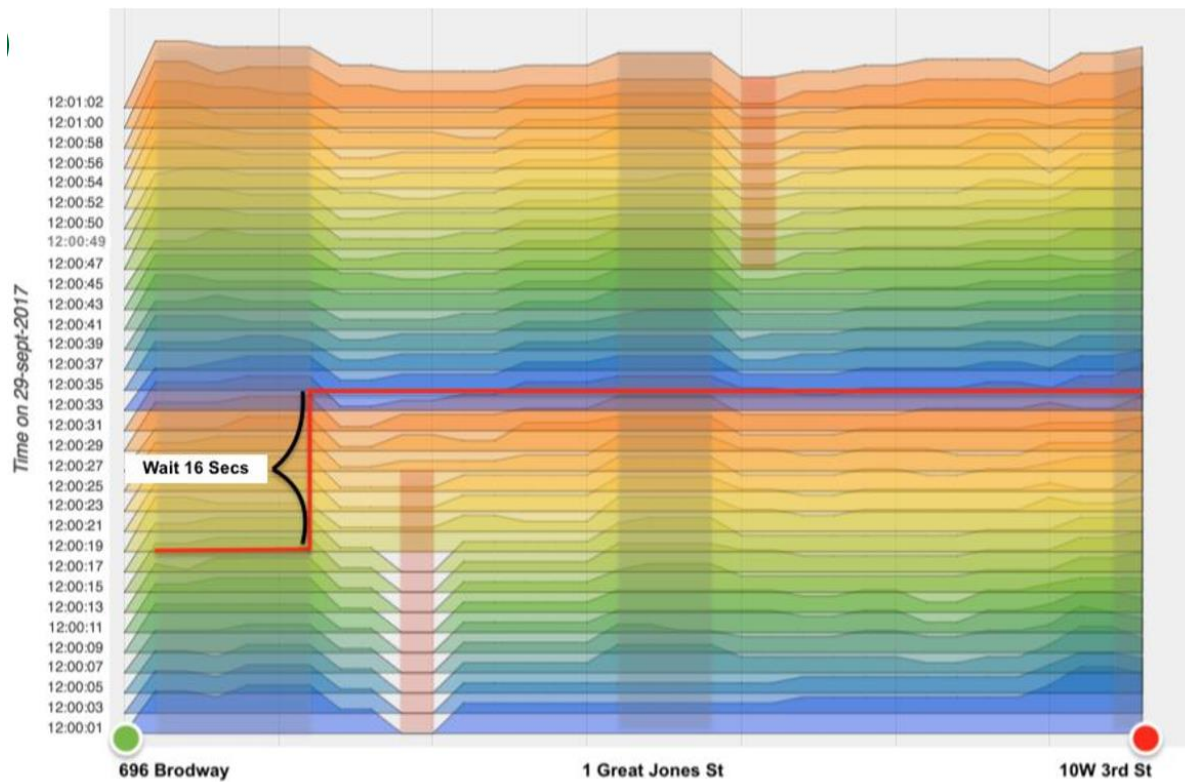


Figura 26. Planificación de la ruta óptima de disponibilidad de posición satelital en un entorno urbano denso. Donde el eje Y corresponde a la hora de partida que hará el vehículo, y el eje X corresponde a la ruta trazada. 696 Broadway es el inicio de la ruta, y finaliza en 10W, 3rd St.



Figura 27. Planificación de la ruta con la mejor opción de disponibilidad de posición satelital en un entorno urbano, representada en un mapa de la ciudad de Nueva York. (a) vista superior 2D. (b) vista en 3D. La parte resaltada en rojo es la zona crítica de la ruta.

Como se vio en el anterior ejemplo bien se puede disponer de distintas horas para hacer un recorrido, y dar diferentes opciones en cuanto a hora de partida del vehículo. Sin embargo, siguiendo los pasos para determinar la disponibilidad de satélites en una ruta, se puede utilizar el método propuesto para las distintas rutas posibles que existan para un punto de partida A, y punto de llegada B. En este caso teniendo solamente una hora de partida disponible, donde finalmente se definirá como ruta óptima quien tenga un menor número de “metros perdidos”, es decir, menor pérdida de posicionamiento satelital por falta de satélites mínimos para el cálculo de la posición. Cuando se refiere a “metros perdidos”, se refiere a que cada 3 metros se evalúa un punto de la ciudad, pues esta es la distancia en que varían las fotografías panorámicas obtenidas por parte de *Google Street View*. Se propone entonces el mismo ejemplo anterior, pero sólo teniendo en cuenta la ruta superior mostrada en la Figura 28, donde la línea azul representa la segunda opción desde el punto de partida y el punto de llegada del vehículo. Esta vez no se tendrá en cuenta distintas horas de partida.

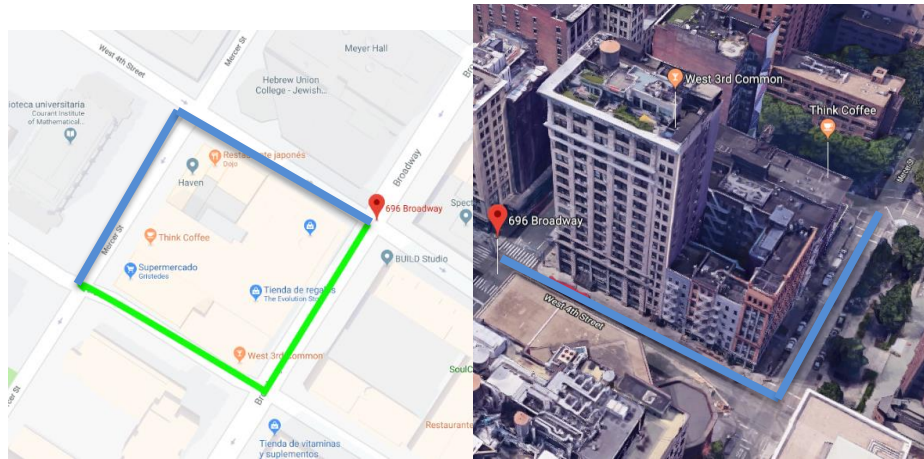


Figura 28. Ruta secundaria entre (246 Mercer St, New York, NY 10012, y 696 Broadway, New York, NY 10003, EE. UU.)

Los resultados se hacen comparando la hora de partida de 07:00 a.m. En la Ruta A (Figura 24) y Ruta B (Figura 28) donde según los datos arrojados por *Google Maps*, toma el mismo tiempo el recorrido por la Ruta A y la Ruta B. Se pueden comparar entonces la Figura 29, donde se observa que la ruta B, tiene un menor número de veces en las cuales se consigue indisponibilidad de satélites en un punto. Lo anterior tiene concordancia al comparar la Figura 25 y la Figura 28, ya que hay un edificio menos con altura considerable, y las zonas arboladas son menos frecuentes en la Ruta B. Sin embargo, ambas rutas comparten el primer edificio y esto se ve reflejado en la comparación realizada, ver Figura 29.

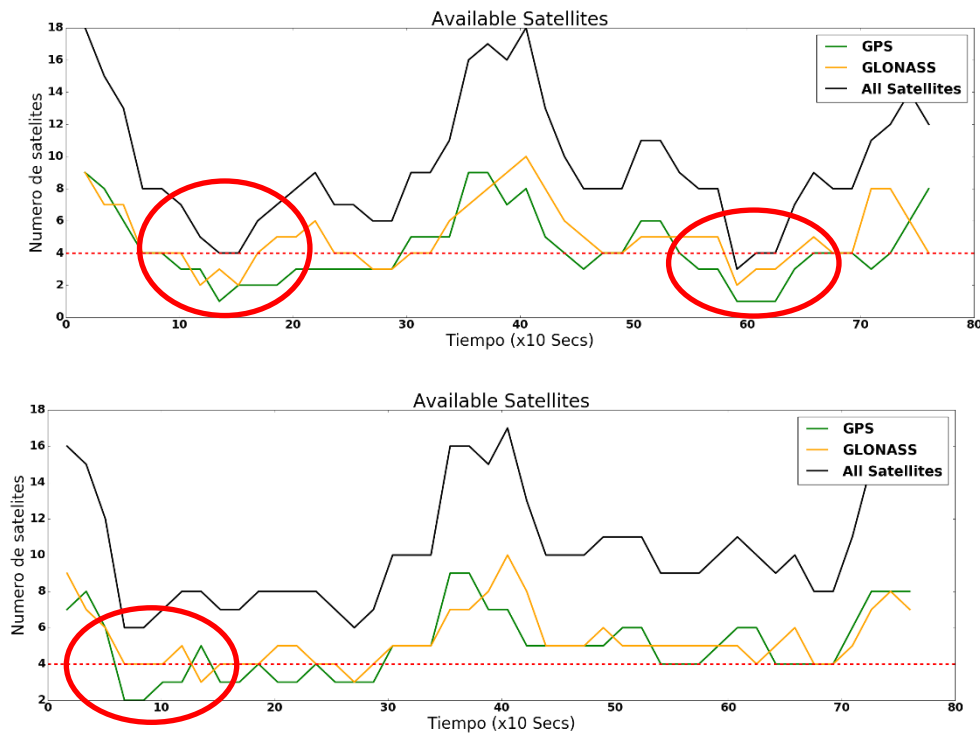


Figura 29. Comparación de Ruta A y Ruta B a las 7:00 a.m.

(Aquí mostrar gráfica de las dos GNSS juntas)

4.2. Comparación de tres rutas extensas

Se hace la siguiente validación en una ruta con un recorrido mayor. Esta ruta fue evaluada a distintas horas ubicada en NewYork, desde Mercer Street con West 4th Street, hasta Thompson Street con Bleecker Street, NY 10012, EE. UU, (Figura 30). Con miras a saber la mejor ruta se simplifica el ejemplo para conocer la menor pérdida de posicionamiento por disponibilidad de satélites en una hora determinada.



Figura 30. Validación en rutas diferentes rutas de NewYork, desde Mercer Street con West 4th Street, hasta Thompson Street con Bleecker Street.

Se analizarán 3 rutas disponibles de punta de partida a punto de llegada, teniendo en cuenta la dirección de las calles, es decir, se planea la ruta teniendo en cuenta que el vehículo no puede ir en contra vía. Para este caso no se tiene en cuenta la diferencia en el tiempo de transcurso, aunque según la librería de *Google maps*, la diferencia es despreciable. La hora a realizar la prueba para todas las posibles rutas será a las 7:00 a. m. del día 29 de septiembre. Para hacer una notación, se le enumerará cada ruta. La ruta de color rojo será la ruta 1. La ruta 2 será marcada con color azul, y finalmente la ruta de color verde será la ruta 3. Dentro de los resultados que se podrían esperar de la prueba, es que en la ruta 3 pueda tener mayor disponibilidad, porque la ruta es un camino de doble vía, en cambio las otras rutas son solo rutas de una sola vía.

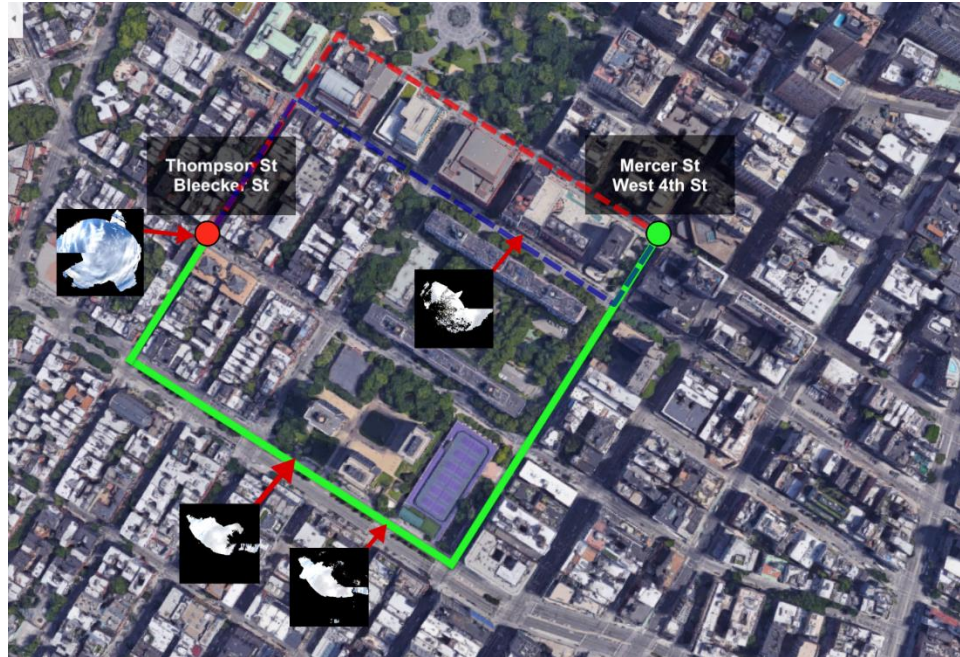


Figura 31. Segmentación en distintas zonas de la validación de distintas rutas en NewYork.

Se seleccionan algunos puntos de la Figura 31, con el fin de mostrar algunos puntos donde las zonas arboladas generan una obstrucción en la señal, y aunque no son edificaciones, generan ruido en la prueba y también generar obstrucción en la señal enviada por los satélites. Por otra parte, se puede observar que en las esquinas siempre se espera un buen resultado pues se encuentran menos obstrucciones y por lo tanto mayor disponibilidad de satélites.

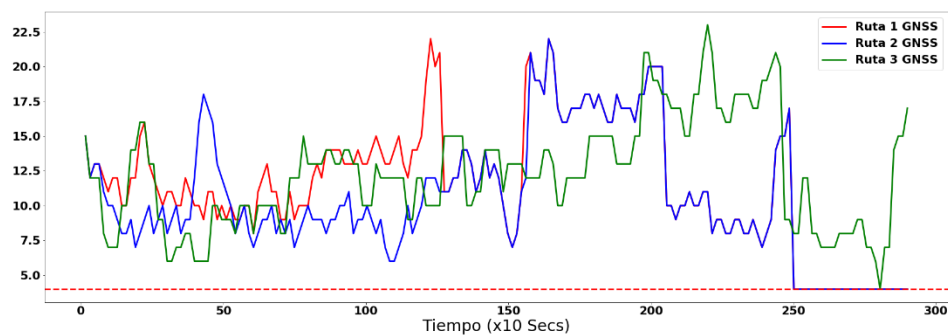


Figura 32. Validación de las 3 rutas en zona de NewYork con receptor GNSS.

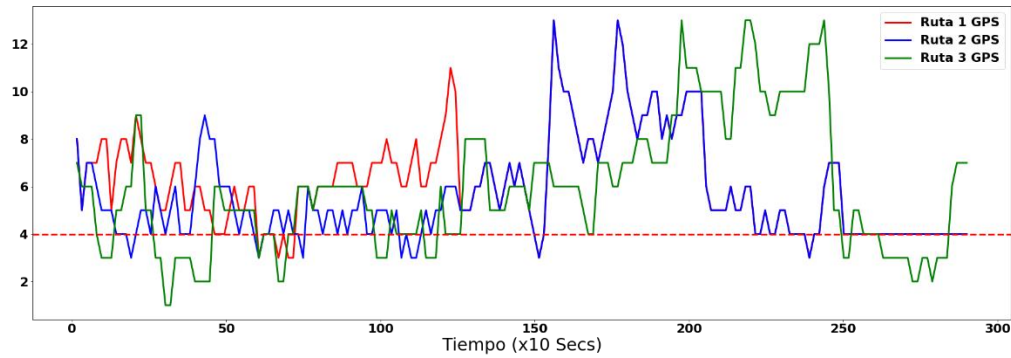


Figura 33. Validación de las 3 rutas en zona de NewYork con receptor GPS.

En la Figura 32 y Figura 33, se encuentra la comparación de las tres rutas tanto GPS como GNSS (GPS + GLONASS). Donde el eje x pertenece a la ruta o recorrido, pero representada en el tiempo de desplazamiento, y el eje y pertenece a la cantidad de satélites disponibles en ese punto. De esta grafica es necesario precisar que en el segundo 250 termina el recorrido de la ruta 1 y ruta 2. Con el fin de mostrar la comparación de las rutas en un mismo escenario se lleva a 4, pero este resultado no será tenido en cuenta. De esta manera se pueden realizar unas gráficas y conocer la cantidad de satélites que se encuentran tanto GNSS como sólo GPS. Si bien la anterior gráfica permite ver el comportamiento de la disponibilidad de satélites a través de la ruta, pero no es posible determinar en cual se genera mayor disponibilidad.

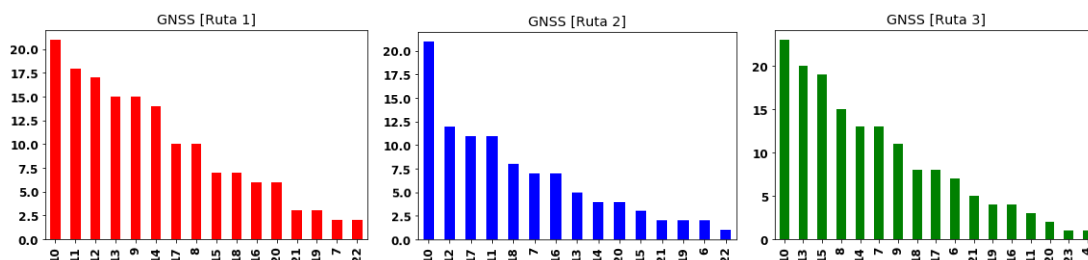


Figura 34. Cantidad de satélites disponibles en la ruta analizada en ruta extensa con receptor GNSS.

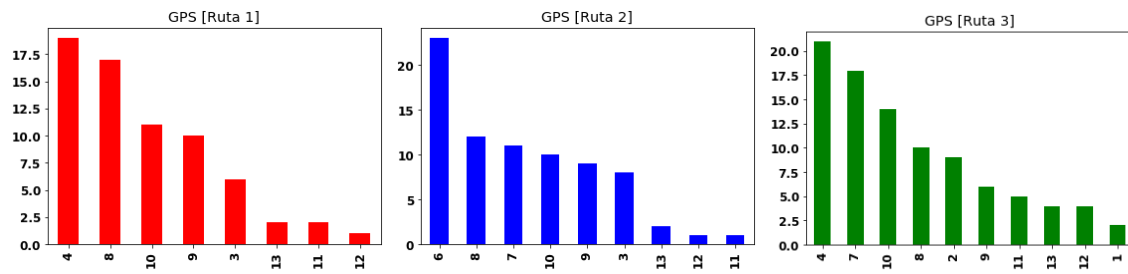


Figura 35. Cantidad de satélites disponibles en la ruta analizada en ruta extensa con receptor GPS.

En la Figura 34 y en la Figura 35, se puede evaluar la cantidad de satélites disponibles en toda la ruta, En cada gráfica el eje x pertenece a la cantidad de satélites disponibles en la ruta, el eje y pertenece a las veces que se repite la cantidad de satélites disponibles en la ruta. Esto permite determinar que la mejor opción, haciendo uso de un receptor GNSS para este caso en particular, será tomar la ruta 1, aunque en la única que se encuentra indisponibilidad es en la ruta 3. Para el caso de un receptor GPS, en cada ruta en algún momento se encontrará indisponibilidad de posicionamiento satelital, en este caso se entraría a evaluar la ruta que tenga un menor de veces en total de indisponibilidad mas no por cantidad de satélites pues con menos de 4 satélites se encontrará indisponibilidad. Igualmente, para este caso la mejor ruta a tomar será la ruta 1.

El anterior resultado puede interpretarse de la siguiente manera: los edificios presentan una obstrucción, pero aun así es menor en comparación a la obstrucción que se encuentran en zonas arboladas. Por otro lado, aunque se esperaba un mejor resultado en la ruta por tener una vía doble no fue el mejor resultado, pero la mayor cantidad de satélite disponibles si fue encontrada en la Ruta 3.

4.3. Comparación de ruta con mismo tiempo transcurrido

Se realiza una validación adicional donde ruta es de media distancia y el tiempo de transcurrido es el mismo. Esta prueba se realiza a distintas horas en el sector de New York, desde Broadway Street con East 8th Street, hasta Waverly PI con University PI (NY 10003, EE. UU) (Figura 36).

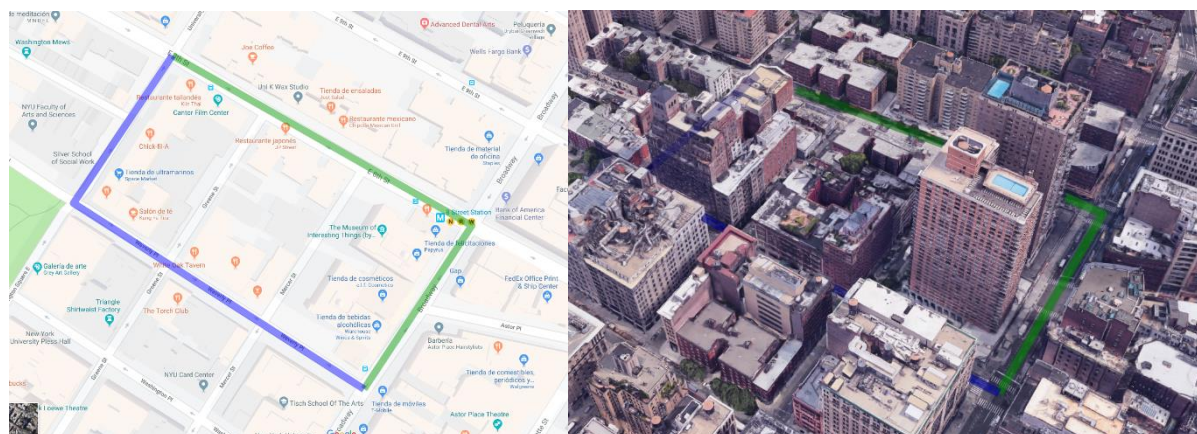


Figura 36. Validación de ruta Broadway Street con East 8th Street, hasta Waverly PI con University PI

La ruta en la cual se hace la validación se toma un mismo tiempo para realizar la validación en ambas rutas, con la característica de tener pocas zonas arboladas y, una aparente similitud en las vías. Como se ve en la Figura 37 y Figura 38, al igual que en las pruebas de la anterior ruta, se evalúan las rutas simulando receptores GPS y receptores GNSS por separado. Esto permitirá analizar el comportamiento de los satélites en una ruta más corta al anterior ejemplo.

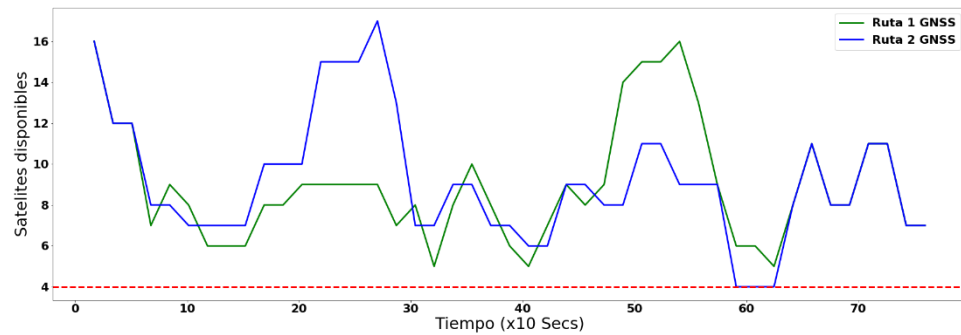


Figura 37. Validación de las 2 rutas en zona de NewYork con receptor GNSS

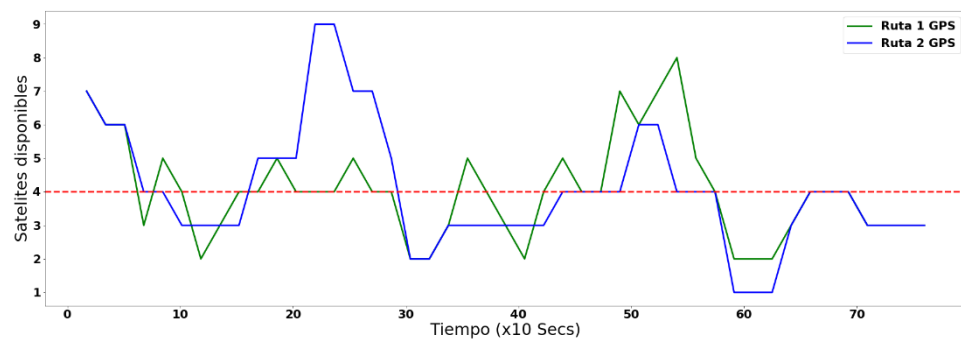


Figura 38. Validación de las 2 rutas en zona de NewYork con receptor GPS

En las figuras (FIG TAL) se analiza nuevamente el número de satélites disponibles en según el número de satélites disponibles en la ruta determinada, nuevamente en cada gráfica el eje x pertenece a la cantidad de satélites disponibles en la ruta, el eje y pertenece a las veces que se repite la cantidad de satélites disponibles en la ruta. Para esta evaluación de la ruta particular se determina que la mejor ruta dependiendo de la suma de las cantidades de indisponibilidad de satélites por cada paso, donde cada paso será la imagen Google Street View que es tomada cada 3 pies. Para GPS la ruta 1 tiene una indisponibilidad en 15 pasos, y la ruta 2 tiene una indisponibilidad de 19. Por lo tanto, para GPS la mejor ruta sería la ruta 1. Para un receptor GNSS ninguna ruta genera indisponibilidad en algún momento. el único riesgo estaría en la ruta 2 que en un paso hay una visibilidad de solo 4 satélites, por lo tanto, la mejor ruta nuevamente sería la ruta 1.

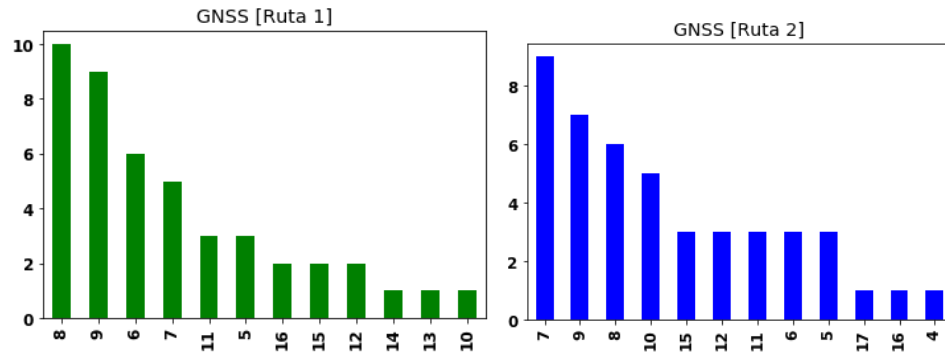


Figura 39. Cantidad de satélites disponibles en la ruta analizada en ruta con receptor GNSS.

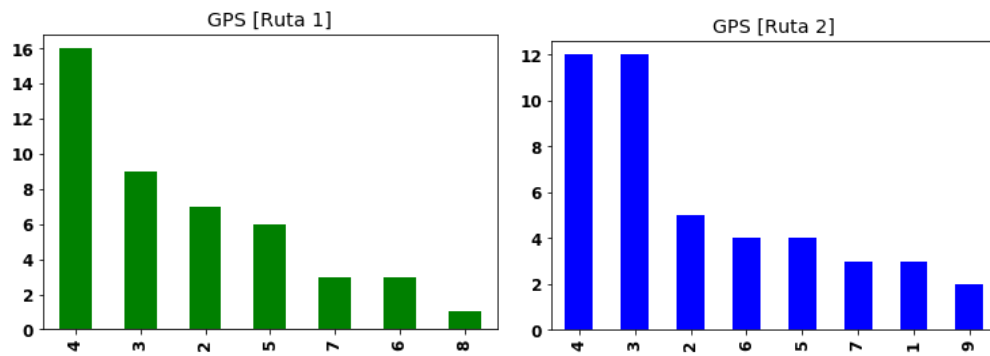


Figura 40. Cantidad de satélites disponibles en la ruta analizada en ruta con receptor GPS.

5. Conclusiones

Se evidenció que disponer de al menos 2 constelaciones para calcular la posición del receptor disminuyen considerablemente la probabilidad de la pérdida de la señal en un entorno urbano. El hecho de tener diferentes características como: periodo, número de órbitas, altura, entre otras. Permite que exista una constante rotación y diferentes configuraciones para disponer de disponibilidad de señales en el entorno urbano denso.

Dadas las pruebas realizadas y comparación de los algoritmos, fue posible notar que el hacer uso de los archivos TLE contribuye en función de la precisión, ya que unifica la información de las constelaciones, dado que los archivos de navegación en cada constelación difieren y esto genera un error distinto para cada constelación. De igual manera, los datos graficados permitieron ver que el uso del algoritmo SGP4 funciona con gran precisión. Esto gracias a que la información de cada satélite es corregida periódicamente, en comparación con la información que puede ser recibida en tiempo real de los satélites.

En la investigación se pudo notar que existe un error asociado a la proyección estereográfica que puede ser despreciado, esto es notado en la fórmula para calcular la transformación de las coordenadas a la proyección estereográfica, son transformadas con el radio de la tierra, que es un elipsoide y variaría su radio, por lo que la proyección estereográfica preserva los ángulos, pero distorsiona las distancias. Además, el utilizar fotografías panorámicas en lugar de CityGML, se puede obtener una menor precisión en la segmentación, pero esto, a cambio de una cantidad de datos disponible mayor con *Google Street View*.

El método presentado en esta investigación permite mostrar la opción de la ruta óptima con la cual no se perderá, o se tendrá la mejor disponibilidad de posicionamiento satelital del vehículo a través de una ruta que esté disponible *Google Street View* y la segmentación realizada con *Deep Learning*. Igualmente, esto permite asegurar una mejor franja horaria de partida del vehículo.

6. Recomendaciones

Durante el desarrollo de la investigación se trabajó con solo dos constelaciones (GPS y GLONASS). Aunque es posible contar con otras constelaciones como Galileo, Beidou, entre otras, se sugiere agregarlas a una investigación futura para conocer su aporte en el tema de la disponibilidad. Esto teniendo en cuenta que, aunque otras constelaciones no están aún completadas, y por lo tanto su disponibilidad es menor como constelaciones independientes, al usar más constelaciones para lograr tener posicionamiento satelital. Para esto, es necesario tener en cuenta la precisión calculada con el uso de otras constelaciones, pues con GLONASS, la diferencia en el cálculo de la posición con esta constelación es despreciable.

Se puede aumentar el *dataset* de entrenamiento a diferentes condiciones climáticas para mejorar la segmentación semántica de las imágenes panorámicas, pues esto mejoraría notoriamente la segmentación semántica realizada a cada imagen panorámica, así como robustez que podría tener como aplicación. Frente al tema de imágenes, también es posible utilizar otras fuentes distintas a *Google Street View* para alternar o mejorar la adquisición de imágenes disponibles, aunque bien se conoce que el mejor proveedor de estas imágenes es el banco de imágenes de Google Street View, ya que también es aportado desde los propios usuarios.

Bibliografía

- Adriana, M. C., & Hernández, M. (2011). *Algoritmos y técnicas de tiempo real para el incremento de la precisión posicional relativa usando receptores GPS estándar*.
- Ahmed Magdy, A., Inal A., H., Bakry A., & Mervat A., A. (2014). Perturbation effect on ground tracks of satellites orbits. Retrieved January 31, 2018, from https://www.researchgate.net/publication/287640820_PERTURBATION_EFFECT_ON_GROUND_TRACKS_OF_SATELLITES_ORBITS
- Al-Hader, M., Rodzi, A., Sharif, A. R., & Ahmad, N. (2009). Smart City Components Architecture. In *2009 International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation* (pp. 93–97). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CSSim.2009.34>
- Amini, A., Vaghefi, R. M., De La Garza, J. M., & Buehrer, R. M. (2014). Improving GPS-based vehicle positioning for Intelligent Transportation Systems. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings* (pp. 1023–1029). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IVS.2014.6856592>
- Badrinarayanan, V., Kendall, A., & Cipolla, R. (2017). SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(12), 2481–2495. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2644615>
- Biljecki, F., Ledoux, H., Du, X., Stoter, J., Soon, K. H., & Khoo, V. H. S. (2016). the Most Common Geometric and Semantic Errors in Citygml Datasets. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W1, 13–22. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W1-13-2016>
- Bradbury, J., Ziebart, M., Cross, P. A., Boulton, P., & Read, A. (2007). Code Multipath Modelling in the Urban Environment Using Large Virtual Reality City Models: Determining the Local

Environment. *Journal of Navigation*, 60(01), 95.
<https://doi.org/10.1017/S0373463307004079>

Burke, J. J. (1973). Stereographic Projection of Radar Data in a Netted Radar System.

Cai, C., & Gao, Y. (2007). Precise Point Positioning Using Combined GPS and GLONASS Observations. *Journal of Global Positioning Systems*, 6(1), 13–22.

Chen, L.-C., Papandreou, G., Kokkinos, I., Murphy, K., & Yuille, A. L. (2014). Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets and Fully Connected CRFs.
<https://doi.org/10.1109/TPAMI.2017.2699184>

Dong, W., & Chang-yin, Z. (2010). An Accuracy Analysis of the SGP4/SDP4 Model. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 34(1), 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.chinastron.2009.12.009>

García Álvarez, D. A. (2008). Sistema GNSS (Global Navigation Satellite System), 1–124.

Greene, M. R., & Zee, R. E. (2009). Increasing the Accuracy of Orbital Position Information from NORAD SGP4 Using Intermittent GPS Readings. *23rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*.

Groves, P. D. (2011). Shadow Matching: A New GNSS Positioning Technique for Urban Canyons. *Journal of Navigation*, 64(03), 417–430. <https://doi.org/10.1017/S0373463311000087>

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *GNSS--global navigation satellite systems : GPS, GLONASS, Galileo, and more*.

Hoots, F. R., & Roehrich, R. L. (1980). Spacetrack Report No. 3--Models for Propagation of NORAD Elements Sets. *Spacetrack Report*, 3(3), 1–91. Retrieved from

<http://celestrak.com/NORAD/documentation/spacetrk.pdf>

International GNSS Service, & RINEX Working Group and Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee. (2013). RINEX The Receiver Independent Exchange Format. *IGS Workshop 2012, 104*, 1–74.

Lee, B.-S. (2002). Norad Tle Conversion From Osculating Orbital Element. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 19(4), 395–402. <https://doi.org/10.5140/JASS.2002.19.4.395>

Li, X., Ge, M., Dai, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J., & Schuh, H. (2015). Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. *Journal of Geodesy*, 89(6), 607–635. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0802-8>

Lu, M., Su, J., Wang, W., & Lu, J. (2017, March 25). Visualization of Kepler's laws of planetary motion. *Physics Education*. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aa539e>

Marais, J., Berbineau, M., & Heddebaut, M. (2005). Land mobile GNSS availability and multipath evaluation tool. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54(5), 1697–1704. <https://doi.org/10.1109/TVT.2005.853461>

Meneghini, C., & Parente, C. (2017). Advantages of Multi GNSS Constellation: GDOP Analysis for GPS, GLONASS and Galileo Combinations. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 7(1), 1–10. Retrieved from <http://ijeti.imeti.org/download/V7-no1-01-10.pdf>

Oh, K. W., Haberl, J. S., & Degelman, L. O. (2000). Enhanced Software for Displaying Orthographic, Stereographic, Gnomonic and Cylindrical Projections of the Sunpath Diagram and Shading Mask Protractor. *Proceedings of the Twelfth Symposium on Improving Building*

- Systems in Hot and Humid Climates*, 234–247. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1969.1/6800>
- Park, C., Kim, I., Lee, J. G., & Jee, G. I. (1996). A satellite selection criterion incorporating the effect of elevation angle in GPS positioning. *Control Engineering Practice*, 4(12), 1741–1746. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(96\)00192-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(96)00192-X)
- Pérez, M., & Binders, B. L. R. (2003). Fundamental Spacecraft Dynamics and Control. *WD Info*, 3(2), 2004. <https://doi.org/10.1002/ejoc.201200111>
- Souza, L. C. L. de, Mendes, J. F. G., & Rodrigues, D. S. (2003). A 3D-GIS Extension for Sky View Factors Assessment in Urban Environment. *The 8th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management*, (1980), 1–13. Retrieved from <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/2299/1/9a2.pdf>
- Suzuki, T., & Kubo, N. (2015). Simulation of GNSS Satellite Availability in Urban Environments Using Google Earth. *The ION 2015 Pacific PNT Meeting*, 1069–1079.
- Vallado, D., Crawford, P., Hujsak, R., & Kelso, T. S. (2006). Revisiting Spacetrack Report #3. In *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit*. <https://doi.org/10.2514/6.2006-6753>
- White, R. M., & Langley, R. B. (2009). Precise point positioning with galileo observables. *Galileo*, 3(1), 8.

Apéndices

APENDICE A. Descripción Modelo SGP

El modelo SGP (*simplified perturbations model*) utiliza la descripción de la órbita descrita en los archivos TLE (APENDICE B). Para entender las siguientes ecuaciones es necesario conocer las variables que son tenidas en cuenta en las ecuaciones y su significado:

n_0 = *época promedio o normal*

e_0 = *la excentricidad promedio o normal de la época*

i_0 = *la inclinación promedio o normal de la época*

M_0 = *la Anomalia promedio o normal de la época*

w_0 = *Argumento del perihelio promedio o normal de la época*

Ω_0 = *Longitud del nodo ascendente promedio o normal de la época*

$\dot{n}_0$ = *Tiempo de cambio promedio o normal de la época*

$\ddot{n}_0$ = *segundo tiempo de cambio promedio o normal de la época*

B^* = *Coeficiente de arrastre de SGP4*

k_e
= $\sqrt{GM}$, donde G es la constante gravitacional y M es la constante de masa de la tierra.

a_E = *Radio ecuatorial de la tierra*

J_2 = *la segunda zona armónica gravitacional de la tierra*

J_3 = *la tercera zona armónica gravitacional de la tierra*

J_4 = *la cuarta zona armónica gravitacional de la tierra*

$(t - t_0)$ = *Tiempo entre épocas*

$XKMPER = 6378.135 \frac{\text{kilómetros}}{\text{radio de la tierra}}$

Teniendo en cuenta entonces las variables utilizadas en el modelo, se describe a continuación el modelo matemático SGP4 para el cálculo de un satélite en un tiempo t .

$$a_1 = \left(\frac{k_e}{n_o} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$\delta_1 = \frac{3}{2} \frac{k_2}{a_1^2} \frac{(3 \cos^2 i_o - 1)}{(1 - e_o^2)^{\frac{3}{2}}}$$

$$a_o = a_1 \left(1 - \frac{1}{3} \delta_1 - \delta_1^2 - \frac{134}{81} \delta_1^3 \right)$$

$$\delta_o = \frac{3}{2} \frac{k_2}{a_o^2} \frac{(3 \cos^2 i_o - 1)}{(1 - e_o^2)^{\frac{3}{2}}}$$

$$n_o'' = \frac{n_o}{1 + \delta_o}$$

$$a_o'' = \frac{a_o}{1 - \delta_o}.$$

$$s^* = a_o''(1 - e_o) - s + a_E$$

$$s^* = 20/XKMPER + a_E. \quad , \text{ se reemplaza el valor de } s \text{ por } ((q_o) - s^4).$$

$$(q_o - s^*)^4 = \left[[(q_o - s)^4]^{\frac{1}{4}} + s - s^* \right]^4.$$

$$\theta = \cos i_o$$

$$\xi = \frac{1}{a_o'' - s}$$

$$\beta_o = (1 - e_o^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\eta = a_o'' e_o \xi$$

$$C_2 = (q_o - s)^4 \xi^4 n_o'' (1 - \eta^2)^{-\frac{7}{2}} \left[a_o'' \left(1 + \frac{3}{2} \eta^2 + 4e_o \eta + e_o \eta^3 \right) + \frac{3}{2} \frac{k_2 \xi}{(1 - \eta^2)} \left(-\frac{1}{2} + \frac{3}{2} \theta^2 \right) (8 + 24\eta^2 + 3\eta^4) \right]$$

$$C_1 = B^* C_2$$

$$C_3 = \frac{(q_o - s)^4 \xi^5 A_{3,0} n_o'' a_E \sin i_o}{k_2 e_o}$$

$$C_4 = 2n_o'' (q_o - s)^4 \xi^4 a_o'' \beta_o^2 (1 - \eta^2)^{-\frac{7}{2}} \left(\left[2\eta(1 + e_o \eta) + \frac{1}{2} e_o + \frac{1}{2} \eta^3 \right] - \frac{2k_2 \xi}{a_o'' (1 - \eta^2)} \times \left[3(1 - 3\theta^2) \left(1 + \frac{3}{2} \eta^2 - 2e_o \eta - \frac{1}{2} e_o \eta^3 \right) + \frac{3}{4} (1 - \theta^2) (2\eta^2 - e_o \eta - e_o \eta^3) \cos 2\omega_o \right] \right)$$

$$C_5 = 2(q_o - s)^4 \xi^4 a_o'' \beta_o^2 (1 - \eta^2)^{-\frac{7}{2}} \left[1 + \frac{11}{4} \eta(\eta + e_o) + e_o \eta^3 \right]$$

$$D_2 = 4a_o'' \xi C_1^2$$

$$D_3 = \frac{4}{3} a_o'' \xi^2 (17a_o'' + s) C_1^3$$

$$D_4 = \frac{2}{3} a_o'' \xi^3 (221a_o'' + 31s) C_1^4.$$

Se incluyen los efectos atmosféricos y la gravedad en las siguientes ecuaciones:

$$M_{DF} = M_o + \left[1 + \frac{3k_2(-1 + 3\theta^2)}{2a_o''^2\beta_o^3} + \frac{3k_2^2(13 - 78\theta^2 + 137\theta^4)}{16a_o''^4\beta_o^7} \right] n_o''(t - t_o)$$

$$\omega_{DF} = \omega_o + \left[-\frac{3k_2(1 - 5\theta^2)}{2a_o''^2\beta_o^4} + \frac{3k_2^2(7 - 114\theta^2 + 395\theta^4)}{16a_o''^4\beta_o^8} + \frac{5k_4(3 - 36\theta^2 + 49\theta^4)}{4a_o''^4\beta_o^8} \right] n_o''(t - t_o)$$

$$\Omega_{DF} = \Omega_o + \left[-\frac{3k_2\theta}{a_o''^2\beta_o^4} + \frac{3k_2^2(4\theta - 19\theta^3)}{2a_o''^4\beta_o^8} + \frac{5k_4\theta(3 - 7\theta^2)}{2a_o''^4\beta_o^8} \right] n_o''(t - t_o)$$

$$\delta\omega = B^*C_3(\cos\omega_o)(t - t_o)$$

$$\delta M = -\frac{2}{3}(q_o - s)^4 B^* \xi^4 \frac{a_E}{e_o \eta} [(1 + \eta \cos M_{DF})^3 - (1 + \eta \cos M_o)^3]$$

$$M_p = M_{DF} + \delta\omega + \delta M$$

$$\omega = \omega_{DF} - \delta\omega - \delta M$$

$$\Omega = \Omega_{DF} - \frac{21}{2} \frac{n_o'' k_2 \theta}{a_o''^2 \beta_o^2} C_1 (t - t_o)^2$$

$$e = e_o - B^*C_4(t - t_o) - B^*C_5(\sin M_p - \sin M_o)$$

$$a = a_o'' [1 - C_1(t - t_o) - D_2(t - t_o)^2 - D_3(t - t_o)^3 - D_4(t - t_o)^4]^2$$

$$\begin{aligned} IL = & M_p + \omega + \Omega + n_o'' \left[\frac{3}{2} C_1 (t - t_o)^2 + (D_2 + 2C_1^2)(t - t_o)^3 \right. \\ & + \frac{1}{4} (3D_3 + 12C_1 D_2 + 10C_1^3)(t - t_o)^4 \\ & \left. + \frac{1}{5} (3D_4 + 12C_1 D_3 + 6D_2^2 + 30C_1^2 D_2 + 15C_1^4)(t - t_o)^5 \right] \end{aligned}$$

$$\beta = \sqrt{(1 - e^2)}$$

$$n = k_e / a^{\frac{3}{2}}$$

$$a_{xN} = e \cos \omega$$

$$\mathcal{I}_L = \frac{A_{3,0} \sin i_o}{8k_2 a \beta^2} (e \cos \omega) \left(\frac{3 + 5\theta}{1 + \theta} \right)$$

$$a_{yNL} = \frac{A_{3,0} \sin i_o}{4k_2 a \beta^2}$$

$$\mathcal{I}_T = \mathcal{I} + \mathcal{I}_L$$

$$a_{yN} = e \sin \omega + a_{yNL}.$$

Se resuelve la ecuación de Kepler por $(E + \omega)$ por la definición:

$$U = \mathcal{I}_T - \Omega$$

$$(E + \omega)_{i+1} = (E + \omega)_i + \Delta(E + \omega)_i$$

$$\Delta(E + \omega)_i = \frac{U - a_{yN} \cos(E + \omega)_i + a_{xN} \sin(E + \omega)_i - (E + \omega)_i}{-a_{yN} \sin(E + \omega)_i - a_{xN} \cos(E + \omega)_i + 1}$$

$$(E + \omega)_1 = U.$$

Y con las siguientes ecuaciones, se calcula la cantidad preliminar necesaria para periodos cortos.

$$e \cos E = a_{xN} \cos(E + \omega) + a_{yN} \sin(E + \omega)$$

$$e \sin E = a_{xN} \sin(E + \omega) - a_{yN} \cos(E + \omega)$$

$$e_L = (a_{xN}^2 + a_{yN}^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$p_L = a(1 - e_L^2)$$

$$r = a(1 - e \cos E)$$

$$\dot{r} = k_e \frac{\sqrt{a}}{r} e \sin E$$

$$r \dot{f} = k_e \frac{\sqrt{p_L}}{r}$$

$$\cos u = \frac{a}{r} \left[\cos(E + \omega) - a_{xN} + \frac{a_{yN}(e \sin E)}{1 + \sqrt{1 - e_L^2}} \right]$$

$$\sin u = \frac{a}{r} \left[\sin(E + \omega) - a_{yN} - \frac{a_{xN}(e \sin E)}{1 + \sqrt{1 - e_L^2}} \right]$$

$$u = \tan^{-1} \left(\frac{\sin u}{\cos u} \right)$$

$$\Delta r = \frac{k_2}{2p_L} (1 - \theta^2) \cos 2u$$

$$\Delta u = -\frac{k_2}{4p_L^2} (7\theta^2 - 1) \sin 2u$$

$$\Delta \Omega = \frac{3k_2\theta}{2p_L^2} \sin 2u$$

$$\Delta i = \frac{3k_2\theta}{2p_L^2} \sin i_o \cos 2u$$

$$\Delta \dot{r} = -\frac{k_2 n}{p_L} (1 - \theta^2) \sin 2u$$

$$\Delta r \dot{f} = \frac{k_2 n}{p_L} \left[(1 - \theta^2) \cos 2u - \frac{3}{2} (1 - 3\theta^2) \right]$$

$$r_k = r \left[1 - \frac{3}{2} k_2 \frac{\sqrt{1 - e_L^2}}{p_L^2} (3\theta^2 - 1) \right] + \Delta r$$

$$u_k = u + \Delta u$$

$$\Omega_k = \Omega + \Delta\Omega$$

$$i_k = i_o + \Delta i$$

$$\dot{r}_k = \dot{r} + \Delta\dot{r}$$

$$r\dot{f}_k = r\dot{f} + \Delta r\dot{f}.$$

Finalmente, la orientación de los vectores será dados por:

$$\mathbf{U} = \mathbf{M} \sin u_k + \mathbf{N} \cos u_k$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{M} \cos u_k - \mathbf{N} \sin u_k$$

$$\mathbf{M} = \left\{ \begin{array}{l} M_x = -\sin \Omega_k \cos i_k \\ M_y = \cos \Omega_k \cos i_k \\ M_z = \sin i_k \end{array} \right\}$$

$$\mathbf{N} = \left\{ \begin{array}{l} N_x = \cos \Omega_k \\ N_y = \sin \Omega_k \\ N_z = 0 \end{array} \right\}.$$

Entonces la posición y la velocidad están dados por:

$$\mathbf{r} = r_k \mathbf{U}$$

$$\dot{\mathbf{r}} = \dot{r}_k \mathbf{U} + (r\dot{f})_k \mathbf{V}.$$

APENDICE B. Descripción formato TLE

A continuación, se describirá el contenido de un formato TLE (*Two-line element set*) (Vallado, Crawford, Hujsak, & Kelso, 2006). La información de un satélite viene dada por dos líneas de información más un encabezado, de la siguiente manera:

G025

```
1 25544U 98067A 08264.51782528 -.00002182 00000-0 -11606-4 0 2927
2 25544 51.6416 247.4627 0006703 130.5360 325.0288 15.72125391563537
```

Con este ejemplo se describirá cada uno de los componentes de este archivo:

Fila 1 (descripción del vehículo espacial):

Tabla 2. Descripción Línea 1 de formato TLE

ID	Columna	Contenido	Ejemplo
1	01–01	Número de línea	1
2	03–07	Número del satélite	25544
3	08–08	Clasificación (U=Unclassified)	U
4	10–11	Últimos 2 dígitos de año de lanzamiento	98
5	12–14	Número del año de lanzamiento	067
6	15–17	Pieza del lanzamiento	A
7	19–20	Época del año de lanzamiento (2 últimos dígitos)	08
8	21–32	Época (día del año y porción del día de lanzamiento en fracción)	264.51782528
9	34–43	Primer tiempo derivado del movimiento medio dividido por 2.	-.00002182
10	45–52	Segundo tiempo derivado del movimiento medio dividido por 6	00000-0
11	54–61	Modelo aerodinámico	-11606-4
12	63–63	Tipo de efémeris	0
13	65–68	Elemento de mejora, se incrementa cada vez que se actualiza un archivo TLE para este satélite	292
14	69–69	Suma de comprobación ⁷	7

⁷ Una suma de comprobación, es un dato derivado de un bloque de datos digitales con el fin de detectar errores que pueden haberse introducido durante su transmisión o almacenamiento.

Línea 2 (descripción de la órbita):

Tabla 3. Descripción Línea 2 de formato TLE

ID	Columna	Contenido	Ejemplo
1	01–01	Número de línea	1
2	03–07	Número del satélite	25544
3	09–16	Inclinación (en grados)	51.6416
4	18–25	Nodo de ascensión derecho (en grados)	247.4627
5	27- 33	Excentricidad	0006703
6	35–42	Argumento del perigee (grados)	130.5360
7	44–51	Anomalía media (en grados)	325.0288
8	53–63	Movimiento medio (revoluciones por día)	15.72125391
9	64–68	Número de revoluciones en la época (revoluciones)	56353
10	69–69	Checksum	7