

## ANÁLISIS PARA LA CORRECCIÓN DE ERRORES EN LA SEÑAL GPS

AUTORES: Fausto Ernesto Orozco Iguasnia<sup>1</sup>

René Omar Villa López<sup>2</sup>

Liliana Guzmán<sup>3</sup>

Wilson Gustavo Chango<sup>4</sup>

DIRECCIÓN PARA CORRESPONDENCIA: [oife@pucesd.edu.ec](mailto:oife@pucesd.edu.ec)

Fecha de recepción: 2020-06-04

Fecha de aceptación: 2020-08-25

### RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue desarrollar el algoritmo de filtro de Kalman en Matlab y su posterior evaluación en la señal GPS para determinar las mejoras que se obtiene ante los diferentes tipos de errores q afecta a la señal en transmisión y recepción. Esta técnica permitió eliminar los diferentes tipos de errores producidos por el ruido térmico, multipath, la refracción entre otros, que afectan principalmente a receptores que trabajan en simple frecuencia. Para realizar la diferenciación se usó los archivos Rinex de los receptores ubicados en tierra, para lo cual se extrajo las medidas de pseudo-rango y la fase de portadora es un tiempo estimado, generando la señal código menos fase denominado (CMC) para luego ser filtrada permitiendo obtener la señal CMC-Suavizada. Para el análisis de datos se aplicó estadística descriptiva, la misma que permitió identificar mediante gráficas las señales originales y corregidas por el algoritmo en varios. Como conclusión se determinó que los valores del tiempo de estabilidad del filtro de Kalman están en un rango de 300 a 1800 segundos permitiendo observar la disminución del error en la señal, es así que entre más grande sea el tiempo estimado se produce una mejora en la reducción de los errores de manera gradual con respecto a la señal original.

**PALABRAS CLAVE:** Telecomunicaciones; sistema de posicionamiento global; archivos rinex; filtro de Kalman; error ionosférico; Matlab

### ANALYSIS FOR CORRECTION OF ERRORS IN THE GPS SIGNAL

#### ABSTRACT

The objective of this investigation was to develop the Kalman filter algorithm in Matlab and its subsequent evaluation in the GPS signal to determine the improvements obtained in the different types of errors that affect the signal in transmission and reception. This technique allowed to eliminate the different types of errors produced by thermal noise, multipath, refraction among

---

<sup>1</sup> Ingeniero en Sistemas Informáticos, Magister en Redes de Comunicaciones, Profesor tiempo completo Escuela de Sistemas en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Santo Domingo, Ecuador.

<sup>2</sup> Ingeniero en Sistemas Informáticos, Magister en Sistemas de Telecomunicaciones, Docente en Instituto Tecnológico Superior Bolívar, Ecuador. E-mail: [memo\\_re7@yahoo.es](mailto:memo_re7@yahoo.es)

<sup>3</sup> Ingeniero en Sistemas Informáticos, Magister en Sistemas de Telecomunicaciones, Sindicato de Choferes Profesionales de Chimborazo, Ecuador. E-mail: [lilygri21@hotmail.com](mailto:lilygri21@hotmail.com)

<sup>4</sup> Ingeniero en Sistemas Informáticos, Magister en Redes de comunicaciones, Profesor tiempo completo Escuela de Sistemas en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Esmeraldas, Ecuador. E-mail [wilson.chango@pucese.edu.ec](mailto:wilson.chango@pucese.edu.ec)

others, which mainly affect receivers that work in simple frequency. To perform the differentiation, the Rinex files of the receivers located on the ground were used, for which the pseudorange measurements were extracted and the carrier phase is an estimated time, generating the code signal less called phase (CMC) and then being filtered allowing get the CMC-Smoothing signal. For the analysis of data, descriptive statistics were applied, which allowed the identification of the original and corrected signals by several algorithms by means of graphs. In conclusion, it was determined that the Kalman filter stability time values are in a range of 300 to 1800 seconds, allowing the decrease in the error in the signal to be observed, so that the larger the estimated time an improvement in the Error reduction gradually with respect to the original signal.

**KEYWORDS:** Telecommunications; global positioning system; rinex files; Kalman filter; ionospheric error; Matlab.

## INTRODUCCIÓN

El mundo experimenta cambios en los sistemas de comunicación digital ya sea a nivel de las comunicaciones o localizaciones donde un punto muy importante para el desarrollo de los sistemas de comunicación digital es tener una buena sincronización de la señal tanto emisor como receptor. Las señales de referencia son de gran importancia para las comunicaciones puesto que estas utilizan a los sistemas de navegación satelital como el GPS debido a que proporcionan un error pequeño y cubren toda la superficie terrestre permitiendo obtener información de cualquier punto equidistante en la tierra.

La precisión de una señal GPS (Sistema de Posicionamiento Global) es una característica importante usada por los sistemas de comunicación y esta es a su vez perturbada por diferentes errores como por ejemplo los errores de orbita, reloj, efemérides, refracción troposférica, refracción ionosférica, interrupción de la señal, ruido térmico, multipath, pérdidas de ciclos, entre otros [1].

Debido al avance de la tecnología satelital y a la inmersión de una gran cantidad de productos tecnológicos, Ecuador cuenta con estaciones de receptoras y monitoreo (SIRGAS – ECUADOR) trabajando en la captura de señales GPS y GLONASS, proporcionando al usuario información satelital georeferenciada compatibles con GPS para la realización de trabajos geodésicos, topográficos, obras de ingeniería, mapeo, geofísica, demarcación, prospección minera y petrolera, entre otros.

El análisis presentado mediante la aplicación del filtro de Kalman en frecuencia simple, permite evidenciar en primera instancia la señal original con errores provocadas por alguna perturbación ocasionada por algún tipo de ruido; mediante la implementación del algoritmo en Matlab proporcionando parámetros fundamentales como la medición del estado y la perturbación a través de la fase de la portadora y el código de la portadora, se obtiene de la señal corregida. Con los satélites objetos de estudio 8, 13, 21, 27 y 38, se establecieron tiempos para el análisis de 300, 600, 1200 y 1800 segundos para cada uno.[11].

El objetivo de la investigación es la evaluación del filtro de Kalman, en donde luego de la implementación del algoritmo en Matlab se pueda determinar la magnitud en que se reducen los errores considerando diversos tiempos de una señal en receptores de simple frecuencia.

## DESARROLLO

### A. *GPS (Sistema de Posicionamiento Global)*

El sistema GPS es un sistema que permite calcular las coordenadas de cualquier punto de la superficie terrestre a partir de la recepción de señales emitidas desde la constelación de satélites que están alrededor de la tierra, y permite localizar cualquier equipo radiorreceptor terrestre mediante sus coordenadas sin importar la posición en cualquier parte del planeta e incluso fuera de ella. En el espectro de frecuencias en los rangos asignados para las bandas de televisión, los espacios en blanco se les conoce como TVWS y un dispositivo que trabaja sobre estos espacios sin causar ningún tipo de interferencia es conocido como dispositivo de espacio en blanco WSD.

El GPS brinda información de la posición mediante la tridimensionalidad, velocidad y tiempo (PVT) a un usuario en que se encuentre en cualquier lugar (Tierra, mar, aire y espacio) del mundo. Las determinaciones de la posición son basadas en mediciones de tiempo de tránsito de señales de radio de por lo menos 4 satélites. Normalmente el GPS contiene características las cuales brinda protección de engaño [6].

### B. *Cálculo de la Posición*

El cálculo depende de dos parámetros importantes como la posición del satélite y del reloj que está dentro de éste, la información enviada es recolectada por el receptor se explica a continuación este proceso [3]:

1. La situación de los satélites es conocida por el receptor con base en las efemérides, parámetros que son transmitidos por los propios satélites.
2. El receptor GPS mide su distancia de los satélites, y usa esa información para calcular su posición. Esta distancia se mide calculando el tiempo que la señal tarda en llegar al receptor. Conocido ese tiempo y basándose en el hecho de que la señal viaja a la velocidad de la luz (salvo algunas correcciones que se aplican), se puede calcular la distancia entre el receptor y el satélite.
3. Cada satélite indica que el receptor se encuentra en un punto en la superficie de la esfera con centro en el propio satélite y de radio la distancia total hasta el receptor.
4. Son necesarios al menos cuatro satélites para obtener la posición, con tres satélites somos capaces de calcular la posición en tres dimensiones, mientras que el cuarto nos permite eliminar los errores de sincronismo.

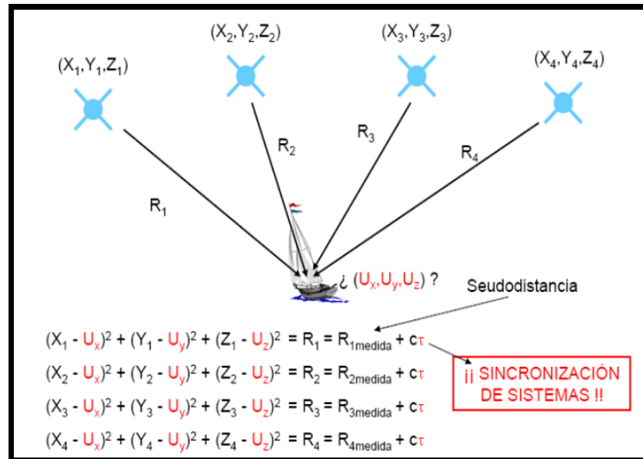


Figura 1 Ecuaciones de Posición

Fuente: Elaboración Propia basada en posicionamiento GPS

### C. Señal GPS

La señal que contiene los datos GPS permite que los datos de ubicación de los satélites y de más información contenida en las transmisiones lleguen a tierra y sea transmitida en modo Brocadas por los satélites, permitiendo que cualquier equipo pueda entender la señal y sea capaz de utilizarla.

Las dos frecuencias portadoras son denominadas L1 y L2 que se multiplican por el oscilador de referencia 10,23 MHz, trabajan de distinta manera por los retardos ocasionados de la atmosfera y estas frecuencias pueden dar a conocer ese retardo y compensarlo.

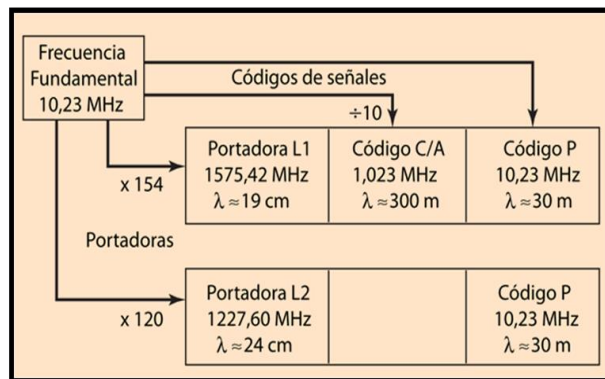


Figura 2 Estructura de la Señal GPS

Fuente: Ayala Ramírez, Alfredo; & Hasbun Bardales Milton Miguel

Las portadoras L1 y L2 se modulan con códigos pseudo-aleatorios empleando técnicas de espectro ensanchado. Cada satélite posee un código C/A exclusivo, lo que genera una modulación específica de onda por cada satélite observado. Esta modulación se la denomina pseudo-ruido aleatorio PRN porque brinda a los receptores una identificación única de la fuente emisora de la señal [3].

- El código C/A: este código se modula en la portadora L1 el cual transporta el mensaje de navegación y es la base del servicio SPS. Este código consiste en una secuencia pseudo-aleatoria

de 1023 MHz que se repite cada 1023 bits. Utiliza modulación de espectro expandido de secuencia directa (DSSS) sobre 1MHz de ancho de banda y la técnica de modulación es BPSK.

- **Código de Precisión P:** El código P es una secuencia código PRN a 10.23 MHz de 267 días de duración. Cada satélite GPS tiene asignado un único segmento de siete días de este código que reinicia el tiempo del GPS cada semana entre el sábado y domingo (el tiempo del GPS es una escala de tiempo continuo con 1 microsegundo de UTC). El código P es normalmente encriptado dentro del código Y para proteger a los usuarios de engaños. Desde que los satélites tienen la capacidad para transmitir ambos códigos, y frecuentemente señalado como código P (Y). El código P (Y) es transmitido por cada satélite en ambos enlaces (L1 y L2). En el enlace L1, el código P(Y) está 90° fuera de fase con el código C/A
- **El código Y:** este código se envía encriptado en vez del código P cuando está activo el modo de operaciones anti-engaños.

### **Pseudo-rango**

Cada equipo calcula la distancia existente entre los satélites observados y el receptor con el fin de determinar sus coordenadas geocéntricas. La falta de sincronización entre los relojes del satélite y el receptor que este a su vez capta la señal transmitida generando una réplica idéntica la cual le permitirá hacer una comparación entre las dos y ver un tiempo medio de viaje.

El pseudo-rango se calcula con el tiempo que tarda la señal electromagnética emitida por el satélite en llegar al receptor multiplicado por la velocidad de la luz, representado matemáticamente como la norma de la diferencia entre los vectores posición de cada uno de ellos.

### **Fase de Portadora**

La fase de portadora es la medida más precisa y se genera mediante la diferencia entre la señal portadora generada por el receptor y la generada por el satélite en el instante de la medición. La señal recibida en cualquier instante puede estar relacionada con la fase del satélite en el momento de la transmisión siendo el tiempo de tránsito, este tiempo es una medida indirecta y ambigua de la señal [5].

La medida de pseudo-rango como la de fase de portadora poseen las mismas fuentes de error, generando una gran diferencia entre las dos medidas; la fase de código proporciona un pseudo-rango equivocado mientras que la fase de portadora proporciona datos del pseudo-rango más preciso.

Fuente de Errores de la Señal GPS

- **Reloj del Satélite.** Una billonésima de segundo de inexactitud en el reloj satelital produce unos 30 cm de error de medición a ese satélite. Por esta razón, los satélites son equipados con relojes atómicos (cesio) muy exactos.
- **Reloj del Receptor.** Similar a los errores del reloj satelital, cualquier error en el reloj del receptor causa inexactitud en medición de distancias.
- **Retardos de Ionósfera y Tropósfera.** La interacción de la señal del GPS con los iones atómicos de la ionósfera causan un retardo en las mediciones fluctuantes de la fase del código colectadas por el receptor. Esto también adelanta la fase de la señal portadora recibida.

- **Multitrayectoria o Multipath.** Ocurre cuando la señal del GPS es reflejada en objetos opacos tal como los edificios o grandes montañas antes que la señal alcance al receptor. Esto incrementa el tiempo de viaje de la señal, por consiguiente causando errores
- **Disponibilidad Selectiva (SA).** El departamento de defensa de EU ha determinado degradar intencionalmente el nivel de precisión del GPS alrededor de 100 metros. Esta degradación es conocida como SA y es implementada para atar los relojes satelitales y reportar inexactamente las órbitas de los satélites. Actualmente está desactivado.
- **Órbita Satelital.** La exactitud de la posición estimada también depende de que tan exactamente se conozca la localización de los satélites. La exactitud de la predicción orbital está en el orden de pocos metros.

#### *D. Archivo Rinex*

RINEX (Receptor de Cambio Independiente) es un formato de fichero de texto ideado para almacenar de forma estandarizada medidas proporcionadas por el sistema de navegación: GPS GLONASS, EGNOS, WAAS o GALILEO en el año 1989 [1]. El archivo RINEX se basa en la mayoría de software GPS empleando lo siguiente:

- La medida de la portadora de fase en una o dos frecuencias (L1 o L1, L2).
- Las medidas de pseudo-rango.
- El tiempo obtenido en el instante de validar las medidas de fase y código.

Esto hace que la mayoría de la información que recogen los receptores sea innecesaria, pues únicamente con estos tres observables y alguna información adicional relativa al estacionamiento (altura de la antena, nombre de la estación, etc.) sería suficiente [11].

Nomenclatura del Archivo Rinex: “**ssssdddff.yyt**”

Donde:

- Los primeros 4 caracteres (ssss) establecen la identificación de la base
- Los tres siguientes (ddd) indican el día del año (365 días)
- El octavo carácter (f) indica el número de sección base
  - 0: archivo de una sección de 24 horas (caso de las EP)
  - a-x: archivo de una sesión de una hora determinada (a= 0h, x= 24h)
- Los dos primeros caracteres de la extensión (yy) corresponden con el año actual base.

El ultimo carácter (t) denota el tipo de fichero (n: navegación GPS o: observación, g: navegación GLONASS, d: para ficheros de observación con comprensión Hatanaka, m: para ficheros de datos meteorológicos y h: mensajes de navegación de carga útil geoestacionaria GPS).

#### **Archivo Rinex de Observación**

Se trata de un archivo que según el tipo de sistema satelital puede ser de cuatro tipos, tipo R corresponde al sistema GLONASS, el S pertenece al sistema GEO, el T pertenece al sistema NNSS, el M es mixto y G corresponde al sistema GPS.

Para el pseudo-rango contempla tres tipos de medidas, C1 (es el código C/A sobre la frecuencia L1), la P1 (código precise en L1), P2 (código P en L2); la fase también posee dos códigos en la frecuencia L1 y frecuencia L2; para el efecto Doppler también se emplea dos medidas D1 y D2 sobre sus respectivas frecuencias. En el caso del SNR también se encuentran dos tipos de medidas S1 en la frecuencia L1 y el S2 para la frecuencia L2. [11].

### **Archivo Rinex de Navegación**

Es un archivo de gran importancia para el análisis del Filtro, debido a que contiene datos orbitales, parámetros del reloj y la predicción de las medidas de pseudo-rango de los satélites observados; su cabecera puede contener mensajes de navegación como los parámetros de modelo ionosférico para aparatos de una sola frecuencia y términos de correcciones con el tiempo GPS. Una gran parte de este fichero tiene un formato ARGO de la NGS. Se transmite un régimen binario de 50 bps y se tarda 12.5 min en enviarlo completamente. En la cabecera del fichero se detalla lo siguiente: N para el sistema GPS G para el sistema GLONASS y H para el sistema SBAS de navegación, así como los parámetros de la ionosfera; en su cuerpo se detalla los datos sobre PRN, el tiempo del satélite, la época y la predicción de cada órbita [9].

#### *E. Filtro de Kalman*

Se trata de un método recursivo para obtener una estimación de estado mínima varianza para un sistema dinámico lineal, partiendo de observaciones imprecisas y bajo la hipótesis de errores gaussianos que se genera en las diferentes comunicaciones. El algoritmo estima que el estado de un sistema dinámico puede ser perturbado por algún ruido, en su mayoría asume como ruido blanco. Kalman usa mediciones que se relacionan con el Estado y perturbaciones para mejorar el estado de la señal [7].

El filtro de Kalman consta de dos pasos:

- 1: la predicción;
- 2: la corrección

En el primer paso el estado predicho por el modelo dinámico; En el segundo paso se corrige con el modelo de observación, de modo que la covarianza del estimador de error se minimiza. En este sentido, es un estimador óptimo; el proceso mostrado en la gráfica se repite para cada intervalo de tiempo con el estado del paso de tiempo anterior como valor inicial.

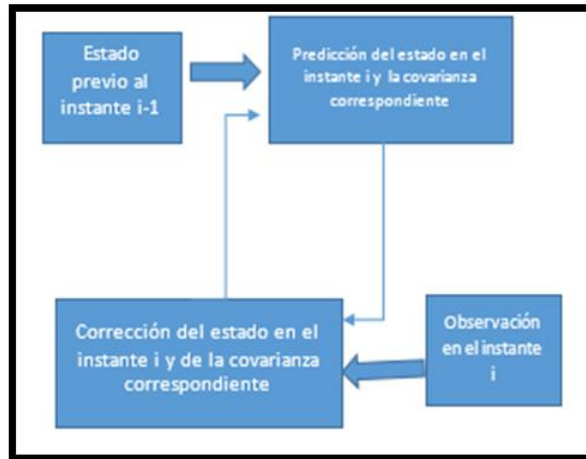


Figura 3 Circuito del Filtro de Kalman

Fuente: Elaboración Propia basada en Filtro de Kalman

Los componentes del filtro de Kalman son el vector de estado, el modelo dinámico y el modelo de observación, que se describen a continuación.

**VECTOR DE ESTADO:** contiene las variables de interés y se describe como el sistema dinámico que representa grados de libertad. Las variables en el vector de estado no se pueden medir directamente, sino que se deducen de los valores que se pueden medir; y los elementos del vector de estado pueden ser por ejemplo, posición, velocidad, ángulos de orientación, entre otros. Al mismo tiempo este vector de estado tiene dos valores, el valor a priori que es el valor previsto antes de la actualización, y el valor a posteriori que es el valor corregido después de la actualización. En adelante, el valor a priori se caracteriza por  $x$  y el valor a posteriori por  $x^+$ .

- **MODELO DINÁMICO:** Permite describir la transformación del vector de estado en el tiempo y está representado por un sistema de ecuaciones diferenciales. En caso lineal está dado por:

$$\dot{x}(t) = F \cdot x(t) + n(t)$$

Donde  $F$  es la matriz dinámica y es constante,  $x(t)$  es el vector de estado y  $N(t)$  es el ruido dinámico, que generalmente se supone como ruido blanco y tiene la matriz de covarianza  $Q(t)$ . [11].

- **MODELO DE OBSERVACIÓN:** El modelo de observación representa la relación entre el estado y las mediciones, en el caso lineal de las mediciones pueden ser descritas por un sistema de ecuaciones lineales, que dependen de las variables de estado. Por lo general, las observaciones se realizan en tiempo discreto pasos  $t_i$ .

$$l(t_i) = h(x(t_i), v(t_i))$$

La forma vectorial de este sistema es:

$$l(t_i) = H \cdot x(t_i) + w(t_i)$$



### Escenario del Filtro de Kalman

Los escenarios de cálculo se dan mediante el modelo matemático de la triangulación generando las siguientes coordenadas (espacio  $(x, y, z)$ , velocidad y tiempo  $(t)$ ), y esto es generado por los satélites que se encuentran en vista en el momento de la petición. Esta señal es receptada por la estación de monitoreo de la cual se extrae los datos que son utilizados para el análisis del algoritmo del filtro de Kalman. [11]

L1 es la frecuencia usada por el satélite es la L1 o L2 que es de uso civil, militar; para el estudio se utilizó la frecuencia que es exclusivamente civil, el cual genera dos medidas: el código de la portadora y la fase de portadora que son receptadas por el usuario receptor [10].

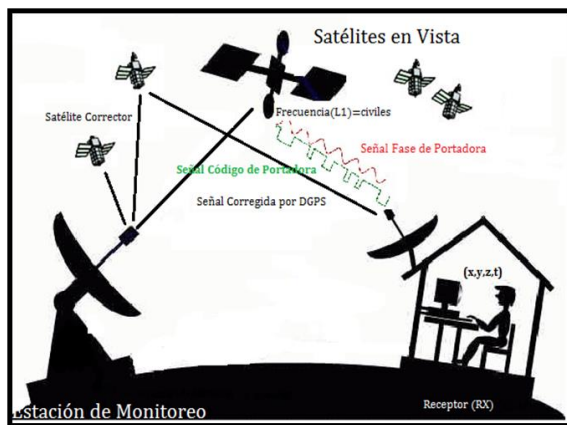


Figura 4 Generación de la Señal L1 y L2

Fuente: Basado en la forma de transmisión de una señal GPS

La longitud de onda generada por de la señal es la medida de fase de portadora que se da en orden de los cm que a su vez genera mejor precisión de la posición del sistema GPS y el error que esta produce es la ambigüedad (es el número desconocidos de ciclos de la fase de portadora, esta onda es comparada entre la generada por el satélite con la generada por el receptor) [4].

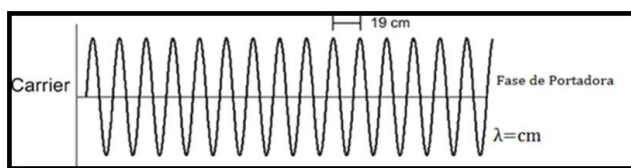


Figura 5 Señal de Fase de Portadora

Fuente: Elaboración propia.

La longitud de onda generada por la señal es la medida del pseudo-rango que se da en orden de los m, siendo un problema más ruidoso por la afectación que produce a la señal de GPS; a su vez este error no permite mejorar la precisión de la posición con respecto a la longitud de onda de la fase de portadora; los errores producidos por esta señal son al ruido termico y el mutipath (o rutas multitrayectos).

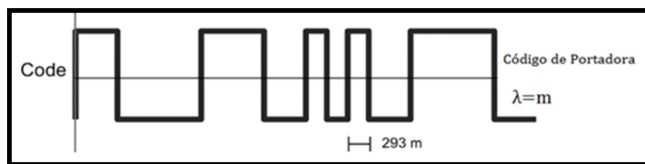


Figura 6 Señal del Pseudo-rango

Fuente: Elaboración Propia

En la figura que se genera posteriormente se procede a explicar todo el funcionamiento del Algoritmo que simula ser el Filtro de Kalman en un tiempo de estabilidad ( $\tau$ ); en primera instancia se extrae la información generada por los satélites que están en vista en el momento de la petición realizada por el usuario (receptor final) y mínimo deben ser 4, luego la información es almacenada en las estaciones receptoras ubicadas en tierra. Los datos almacenados son los Archivos RINEX universales, de los cuales se extrae dos que son: de Observación y Navegación de donde se extraer la información que se utilizara para el funcionamiento del filtro de Kalman; la técnica aplicada en la extracción de los datos se detalla claramente en el capítulo anterior. [11]

Después de extraer la información de los archivos RINEX de observación y navegación se genera dos medidas: el pseudo-rango, la fase de portadora que se encuentran a la entrada del receptor, posterior se hace la diferenciación de las dos señales para eliminar algunos errores que se encuentran en común y otros se minimizaran, se genera un resultado el que es el código (CMC); que ingresa al filtro de Kalman para ser filtrada en un tiempo de estabilidad ( $\tau$ ) que permitirá ver en la gráfica la mejora en la precisión. [11]

Se procederá a generar el código (CMC) filtrado que junto con la medida de entrada pseudo-rango a la salida se realiza una comparación entre la gráfica inicial con la resultante para ver la mejora que hay en la precisión de la posición del sistema estándar de GPS. Se realiza una comparación entre la señal inicial con la señal filtrada o mejorada, esto se puede ver en la gráfica generada al final del filtro de Kalman; aquí están las variables usadas para la representación de la misma en el eje de las Y se ve la señal (CMC original y CMC filtrada) dada en metros (m) y en el eje de las X se encuentra la época dado en segundos (s).

## RESULTADOS

Tiempo de Estabilidad de tiempo ( $\tau=300$ )

Para esto se genera una gráfica con las señales originales y corregidas por Filtro de Kalman en un tiempo estimado de 300 segundos permitiendo la eliminación de algunos errores como por ejemplo el ruido térmico, falta de sincronización entre los relojes del satélite y receptor, error ionosférico, entre otros que afectan la señal GPS en el momento de su trasmisión desde el satélite hacia el receptor.

Satélite # 8 en vista

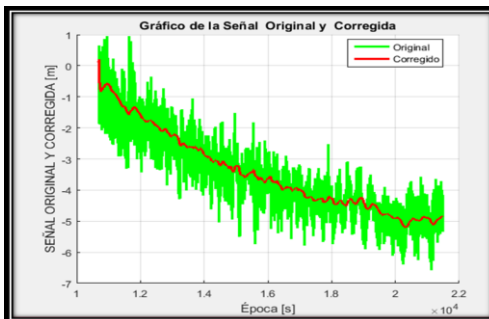


Figura 7 Grafica del satélite # 8 de la señal CMC (original y corregida)  $\tau=300$

Fuente: Elaboración Propia del análisis en Matlab

En la figura 7 se obtiene un error máximo de 92 cm y luego se aplica el filtro de Kalman y se obtiene una reducción de los errores de falta de sincronización entre los relojes del satélite, ruido térmico, error ionosférico entre otros es de 21 cm del valor máximo y la diferencia de estos dos valores son 71 cm que representa el 77, 17% lo que indica que estos errores se redujeron a más de la mitad de la señal original [11].

Errores CMC-Original y CMC-Filtrada del satélite # 8 en  $\tau=300$

Tabla 1 Errores con  $t=300$  s

Errores	Original	Corregido	Diferencial	Porcentaje
Valor Máximo	0,92m (92 cm)	0,21m (21cm)	0,71m (71 cm)	77,17%

Tiempo de Estabilidad de tiempo ( $\tau=600$ )

Se genera la gráfica de la señal CMC filtrada y original se aplica un tiempo máximo de 600 segundos que permite mantener la estabilidad del filtro y corregir los errores de ruido térmico, ionosférico, que están presentes en la misma. Estas graficas generadas son de todos los satélites que se encuentran en vista en el momento de la petición [11].

Satélite # 8 en vista

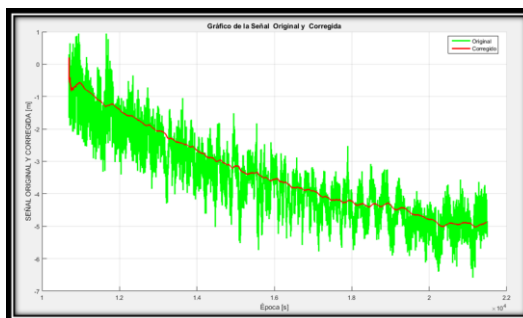


Figura 8. Grafica del satélite # 8 de la señal CMC (original y corregida)  $\tau=600$ .

Fuente: Elaboración Propia del análisis en Matlab

En la figura 8 se obtiene un error máximo de 92 cm y luego se aplica el filtro de Kalman y se obtiene una reducción de los errores de falta de sincronización entre los relojes del satélite, ruido térmico, error ionosférico entre otros es de 19

cm del valor máximo y la diferencia de estos dos valores son 73 cm que representa el 79,34% lo que indica que estos errores se redujeron a más de la mitad de la señal original [11].

Errores CMC-Original y CMC-Filtrada del satélite # 8 en  $\tau=600$

Tabla 2 Errores con t=600 s

Errores	Original	Corregido	Diferencial	Porcentaje
Valor Máximo	0,92m (92 cm)	0,19m (19cm)	0,73m (73 cm)	79,34%

Tiempo de Estabilidad de tiempo ( $\tau=900$ )

Se genera una gráfica con las señales originales y corregidas por Filtro de Kalman en un tiempo estimado de 900 segundos permitiendo la eliminación de algunos errores como por ejemplo el ruido térmico, falta de sincronización entre los relojes del satélite y receptor, error ionosférico, entre otros que afectan la señal GPS en el momento de su transmisión desde el satélite hacia el receptor [11].

Satélite # 8 en vista

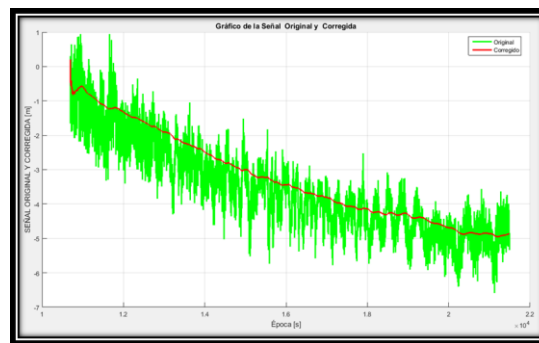


Figura 9. Grafica del satélite # 8 de la señal CMC (original y corregida)  $\tau=900$ .

Fuente: Elaboración Propia del análisis en Matlab

En la figura se obtiene un error máximo de 92 cm y luego se aplica el filtro de Kalman y se obtiene una reducción de los errores de falta de sincronización entre los relojes del satélite, ruido térmico, error ionosférico entre otros es de 17 cm del valor máximo y la diferencia de estos dos valores son 75 cm que representa el 81,52% lo que indica que estos errores se redujeron a más de la mitad de la señal original.

Errores CMC-Original y CMC-Filtrada del satélite # 8 en  $\tau=900$

Tabla 3 Errores con t=900 s

Errores	Original	Corregido	Diferencial	Porcentaje
Valor Máximo	0,92m (92 cm)	0,17m (17cm)	0,75m (75 cm)	81,52%

Tiempo de cálculo para el Filtro de Kalman ( $\tau=1200$ )

Se genera una gráfica con las señales originales y corregidas por Filtro de Kalman en un tiempo estimado de 1200 segundos permitiendo la eliminación algunos errores como por ejemplo el

ruido térmico, falta de sincronización entre los relojes del satélite y receptor, error ionosférico, entre otros que afectan la señal de GPS en el momento de su transmisión desde el satélite hacia el receptor [11].

Satélite # 8 en vista

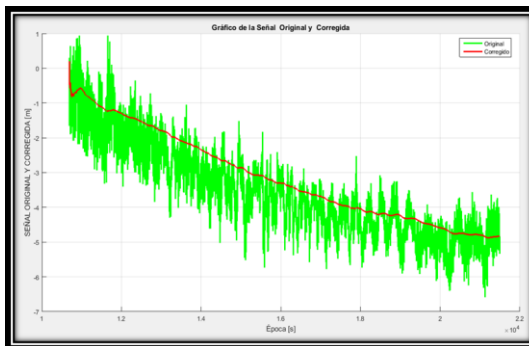


Ilustración 10 Grafica del satélite # 8 de la señal CMC (original y corregida)  $\tau=1200$ .

Fuente: Elaboración Propia del análisis en Matlab

En la figura 10 se obtiene un error máximo de 92 cm y luego se aplica el filtro de Kalman y se obtiene una reducción de los errores de falta de sincronización entre los relojes del satélite, ruido térmico, error ionosférico entre otros es de 15 cm del valor máximo y la diferencia de estos dos valores son 77 cm que representa el 83, 69% lo que indica que estos errores se redujeron a más de la mitad de la señal original.

Errores CMC-Original y CMC-Filtrada del satélite # 8 en  $\tau=1200$

Tabla 4 Errores con  $t=1200$  s

Errores	Original	Corregido	Diferencial	Porcentaje
<b>Valor Máximo</b>	0,92m (92 cm)	0,15m (15cm)	0,77m (77 cm)	83,69%

Tiempo de cálculo para el Filtro de Kalman ( $\tau=1800$ )

Se genera una gráfica con las señales originales y corregidas por Filtro de Kalman en un tiempo estimado de 1800 segundos permitiendo la eliminación de algunos errores como por ejemplo el ruido térmico, falta de sincronización entre los relojes del satélite y receptor, error ionosférico, entre otros que afectan la señal GPS en el momento de su transmisión desde el satélite hacia el receptor [11].

Satélite # 8 en vista

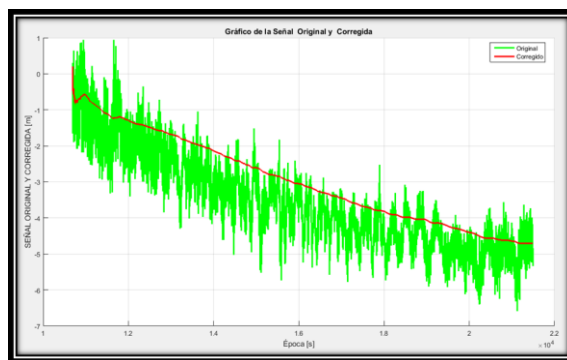


Ilustración 11 Grafica del satélite # 8 de la señal CMC (original y corregida)  $\tau=1800$ .

Fuente: Elaboración Propia del análisis en Matlab

En la figura 11 se obtiene un error máximo de 92 cm y luego se aplica el filtro de Kalman y se obtiene una reducción de los errores de falta de sincronización entre los relojes del satélite, ruido térmico, error ionosférico entre otros es de 12 cm del valor máximo y la diferencia de estos dos valores son 80 cm que representa el 86,95% lo que indica que estos errores se redujeron a más de la mitad de la señal original [11].

Errores CMC-Original y CMC-Filtrada del satélite # 8 en  $\tau=1800$

Tabla 5 Errores con  $t=1800$  s

Errores	Original	Corregido	Diferencial	Porcentaje
<b>Valor Máximo</b>	0,92m (92 cm)	0,12m (12cm)	0,80m (80 cm)	86,95%

### Resumen de resultados Generales

Tabla 6 Resumen de aplicación del filtro de Kalman de los satélites en tiempo "t"

Filtro de Kalman					
Tiempo ( $\tau$ )	# de Satélite	Señal Original	Señal Corregida	Diferencial	% de Corrección
<b>300</b>	8	0,92m (92 cm)	0,21m (21cm)	0,71m (71 cm)	77,17%
<b>600</b>	8	0,92m (92 cm)	0,19m (19cm)	0,73m (73 cm)	79,34%
<b>900</b>	8	0,92m (92 cm)	0,17m (17cm)	0,75m (75 cm)	81,52%
<b>1200</b>	8	0,92m (92 cm)	0,15m (15cm)	0,77m (77 cm)	83,69%
<b>1800</b>	8	0,92m (92 cm)	0,12m (12cm)	0,80m (80 cm)	86,95%

### Análisis y discusión de Resultados

Los errores que más afecta la señal del GPS son el ruido térmico, multipath, la refracción que afecta principalmente a receptores que trabajan en simple frecuencia; los otros que no afectan en gran cantidad a la señal del GPS influyen y causan impacto en la precisión de la posición. Para poder hacer la eliminación de los diferentes errores se ha propuesto como alternativa la aplicación de la técnica del Filtro de Kalman. Los valores asignados al tiempo de estimación ( $\tau$ ) se establece en un rango de 300 a 1800 segundos, observando la disminución de los errores y

dando estabilidad a la señal ya que se verifica la supresión de picos que representan los valores afectados.

Como resultado del análisis de la aplicación del filtro en las medidas del satélite 8 se observa que los datos brutos indican un valor nominal de error de (92) cm respectivamente al aplicar el filtro de Kalman con un tiempo estimado ( $\tau=300$ ) se reduce el error a (21) cm alcanzado una reducción de los errores en un 77,17% respecto a la señal original. Considerando los mismos parámetros al aplicar el filtro con un tiempo estimado ( $\tau=1800$ ) se reduce el error a (12) cm alcanzado una reducción de los errores en un 86,95% respecto a la señal original. Es por ello que se ha podido determinar que los valores del tiempo de estabilidad del filtro de Kalman, están en un rango de 300 a 1800 segundos, se observa la disminución del error que representan los valores afectados por los errores del ruido térmico y error ionosférico. Del análisis de los datos se puede determinar que entre más grande sea el tiempo estimado se produce una mejora en la reducción de los errores de manera gradual con respecto a la señal original. El estudio presentado aplica a receptores de simple frecuencia como solución al inconveniente generado en la transmisión de la señal.

## CONCLUSIONES

Mediante la fundamentación teórica se ha podido determinar algoritmo, elementos y factores de error que inciden en la comunicación de la señal GPS así como la determinación de los tiempos adecuados para la evaluación y corrección de errores de la señal.

Uno de los elementos fundamentales identificados son los archivos RINEX, el mismo que nos proporciona información importante con diferentes parámetros referente a la ubicación solicitada por el receptor quienes se encuentran en las Estaciones Base.

Los errores que no se pueden eliminar es el ionosférico y el multipath estos pueden ser objeto de limitaciones operativas con el filtro de Kalman, permitiendo al mismo tiempo que la estación receptora pueda recibir estos errores en períodos prolongados.

Por medio de la utilización del Estadístico  $\chi^2$  se comprueba la hipótesis ya que  $\chi^2$  calculado obtiene un valor de 10.253 que es superior a  $\chi^2$  tabla=4.605 por lo tanto se acepta la hipótesis de investigación la misma que dice: “Al desarrollar y evaluar el algoritmo del Filtro de Kalman permitirá mejorar la precisión del posicionamiento GPS”.

La implementación del Algoritmo de Filtro de Kalman en frecuencia simple permite mejorar la precisión de la posición en el receptor GPS eliminando los errores, quedando para una futura investigación el estudio en transmisores de doble frecuencia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHN, Jongsun; HEE, Won Dae; & KYUNG, Sung Sang. Orbit Ephemeris Failure Detection in a GNSS Regional Application [en línea]. Corea: Article in International Journal of Aeronautical and Space Science. [Consulta: 2017-01-10]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/274382340\\_Orbit\\_Ephemeris\\_Failure\\_Detection\\_in\\_a\\_GNSS\\_Regional\\_Application](https://www.researchgate.net/publication/274382340_Orbit_Ephemeris_Failure_Detection_in_a_GNSS_Regional_Application)

AYALA RAMÍREZ, Alfredo; & HASBUN BARDALES Milton Miguel. Aplicaciones Y Uso De La Tecnología De GPS Diferencial De Doble Frecuencia Con Precisión Centimétrica En El Área De Levantamiento Y Replanteo Topográfico Georeferenciado. [en línea] (tesis). (Pregrado) Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Civil, San Salvador,

El Salvador. 2012. pp. 28-62. [Consulta: 2016-11-25]. Disponible en: [http://ri.ues.edu.sv/1762/1/TESIS\\_DE\\_GPS\\_DIFERENCIAL\\_EN\\_PDF.pdf](http://ri.ues.edu.sv/1762/1/TESIS_DE_GPS_DIFERENCIAL_EN_PDF.pdf)

AYANCAN LEIVA, Boris; & NARVÁEZ CÁRDENAS Sebastián. Sistema GPS Y Bitácora Electrónica De Móviles [en línea]. (Tesis). (Pregrado) Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Electricidad y Electrónica. Valdivia, Chile. 2008. pp. 30-44. [Consulta: 2016-09-12]. Disponible en: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/bmfcia973s/doc/bmfcia973s.pdf>

BONGIOVANNI, Rodolfo; CHARTUNI, Evandro; BEST, Stanley; & ROEL, Álvaro. Agricultura De Precisión: Integrando Conocimientos Para Una Agricultura Moderna Y Sustentable [en línea]. Brasilia, Brasil. [Consulta: 2016-05-09]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=1ef6NN2XsAC&pg=PA5&dq=antecedentes+de+DGPS&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj5-e-zm6jNAhUBYZ4KHQ6hCX4Q6AEIJzAB#v=onepage&q=antecedentes%20de%20DGPS&f=false>

BOSSLER, John. MANUAL OF GEOSPATIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY [en línea]. New York, Estados Unidos: Taylor & Francis, 2002 [Consulta: 2016-06-08]. Disponible en: [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=XVJwDrkZA1wC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Manual+Geospatial+Science+and+Technology&ots=M5b2LOdZfG&sig=LdM2bCaQwgg620WtbmH\\_LprJCc0#v=onepage&q=Manual%20Geospatial%20Science%20and%20Technology&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=XVJwDrkZA1wC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Manual+Geospatial+Science+and+Technology&ots=M5b2LOdZfG&sig=LdM2bCaQwgg620WtbmH_LprJCc0#v=onepage&q=Manual%20Geospatial%20Science%20and%20Technology&f=false)

DEOSSA MOLINA, Pablo Andrés; Entrenamiento de redes neuronales con filtros de Kalman [en línea]. (tesis) (Pregrado), Universidad Nacional de Colombia sede en Medellín, Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Mecánica, Medellín, Colombia, 2009. pp. 5-120. [Consulta: 2017-02-10]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Pablo\\_Deossa/publication/30757746\\_Entrenamiento\\_de\\_redes\\_neuronales\\_con\\_filtros\\_de\\_Kalman/links/57fcd1dd08aed4ab46fe5ad0/Entrenamiento-de-redes-neuronales-con-filtros-de-Kalman.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Pablo_Deossa/publication/30757746_Entrenamiento_de_redes_neuronales_con_filtros_de_Kalman/links/57fcd1dd08aed4ab46fe5ad0/Entrenamiento-de-redes-neuronales-con-filtros-de-Kalman.pdf)

DOMÍNGUEZ, Cecilia; & RODRÍGUEZ, Jéssica; Contribución De La Técnica Satellite Laser Ranging A Los Sistemas De Posicionamiento Glonass, Beidou Y Galileo [en línea]. (tesis). (Pregrado), Universidad Nacional de San Juan. Facultad de Ingeniería Departamento de Agrimensura, Ingeniero Agrimensor, San Juan, 2015. pp. 7-34. [Consulta: 2016-04-17]. Disponible en: <ftp://ftp.unsj.edu.ar/agrimensura/Trabajo%20Final/Tesis%20Dominguez-Rodriguez.pdf>

FÁREZ BUENAÑO, Carlos Antonio; Implantación De Una Estación Permanente Gns En El Campus De La Universidad Técnica Particular De Loja [en línea]. (tesis). (Pregrado). Universidad Técnica Particular de Loja. Loja, Ecuador. 2010. pp.16-24. [Consulta: 2016-06-22]. Disponible en: <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/2467/1/Tesis.pdf>

FERNANDEZ QUESADA, Isabel; Aplicación del filtro de Kalman al análisis y predicción de entornos productivos empresariales [en línea]. (tesis). (Pregrado). Universidad de Oviedo. 2002. pp.11-28. [Consulta: 2017-05-22]. Disponible en: [http://adingor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2002/metodos\\_cuantitativos/C086.pdf](http://adingor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2002/metodos_cuantitativos/C086.pdf)

R. Villa, « Desarrollo y evaluación del algoritmo del filtro de Kalman para mejorar la precisión del posicionamiento GPS>>, Riobamba, ESPOCH, 2018.