

SISTEMA GPS DE GUIADO AUTONOMO CORREGIDO

L. Mendoza ¹, R. Perdomo ^{1,2} y D. Del Cogliano ^{1,2}

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - Universidad Nacional de La Plata.

² CONICET

lmendoza@carina.fcaglp.unlp.edu.ar; perdomo@fcaglp.unlp.edu.ar; daniel@fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

La Agricultura de Precisión (AP) utiliza un conjunto de herramientas técnicas e informáticas a fin de optimizar el manejo específico del sitio de cultivo. Estas herramientas incluyen *software* SIG y estadístico, sensores remotos, registros en el terreno, la aplicación controlada de agroquímicos y sistemas para el guiado preciso de la maquinaria agrícola. Se desarrolla aquí un software original para guiado autónomo que satisface los requerimientos de precisión para algunas aplicaciones de la AP.

Palabras claves: GPS, sistema de guiado autónomo preciso, agricultura de precisión, DGPS

ABSTRACT

The Precision Agriculture (PA) uses many technical and computational tools to optimize the site-specific management of the land. These tools include GIS and statistical software, remote sensors instruments, records on the field, variable agrochemicals dose, and precise guiding systems. We describe here an original software for an autonomous guiding system which satisfies many PA requirements.

Keywords: GPS, autonomous guiding system, precision agriculture, DGPS

MOTIVACION

Cuando las precisiones requeridas por la AP son intermedias (decenas de centímetros) como ocurre al guiar maquinaria agrícola, se utilizan generalmente dos métodos de posicionamiento: los sistemas DGPS (*Differential GPS*) y los sistemas autónomos corregidos, conocidos comercialmente como *e-Dif* (*Extended Differential*).

Los sistemas de tipo autónomo corregido presentan ventajas respecto de los sistemas DGPS: menor costo de implementación; no requieren pago de suscripciones; no dependen de la disponibilidad de la señal correctora; es posible utilizarlos en todo el planeta.

Sin embargo la información disponible sobre su funcionamiento y comportamiento es muy escasa y su utilización práctica es distinta

de la de los sistemas DGPS, lo que puede llevar a un uso inadecuado por parte de los usuarios.

Para experimentar y evaluar las aplicaciones de este tipo de sistemas se desarrolló un algoritmo original de guiado autónomo.

SISTEMA DESARROLLADO

Introducción

Las siglas *e-Dif* provienen del término *extended diferencial*. Este sistema genera correcciones autónomas respecto de una coordenada de referencia arbitraria y las extrapola en el tiempo asegurando un posicionamiento relativo muy consistente.

El método que se desarrolla aquí fue diseñado para ser implementado sobre un receptor monofrecuencia utilizando el

observable pseudo distancia y el observable fase. El observable pseudo distancia para la época t se modela según la ecuación (1), donde n es el número de satélites registrados en la época t ; j es el superíndice identificador de satélite; τ es tiempo de viaje de la señal [s]; ρ es la distancia geométrica sitio-satélite [m]; C es el observable pseudo distancia [m]; t es el tiempo de recepción en la escala GPS [s]; δt es el *offset* del reloj del receptor [s]; δt^j es el *offset* del reloj del satélite [s]; c es la velocidad de la luz en el vacío [m/s] y ε es el error de observación [m].

En la ecuación (1), el término ε contiene el error aleatorio del código C/A así como también los errores sistemáticos no modelados. Tanto las coordenadas ECEF (Earth Centered Earth Fixed) de los satélites como

el *offset* del reloj de los mismos están implícitos en esta ecuación y se calculan a partir de la información contenida en el mensaje de navegación. Los parámetros de modelo a estimar son entonces las coordenadas ECEF del sitio y el *offset* del reloj del receptor.

Para estimar los parámetros se linealiza la ecuación (1) y se utilizan valores \mathbf{r}_0 y δt_0 *a priori* de las coordenadas del sitio y del *offset* del reloj del receptor, lo que resulta en la ecuación (2), donde los Δp_i son ahora los parámetros a estimar en la ecuación (3)

Luego de evaluar las derivadas de la modelización (matriz de diseño), de construir el término independiente (O-C) y descartando los términos de mayor orden, la ecuación (2) toma la forma de la ecuación (4), donde se

$$C^j(t) = \rho^j(t - \tau^j, t) + c\delta t(t) - c\delta t^j(t - \tau^j) + \varepsilon^j(t) \quad j = 1, \dots, n \quad (1)$$

$$\Delta C^j(t - \tau^j, t) = \sum_{i=1}^4 \frac{\partial C^j(t)}{\partial p_i(t)} \Big|_{p_1^0 \dots p_4^0} \Delta p_i(t) + \underbrace{\mathcal{O}(\Delta p_i(t)^2)}_{\text{errores de mayor orden}} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} (\Delta p_1, \Delta p_2, \Delta p_3)^T &= (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)^T = \mathbf{r} - \mathbf{r}_0 = \Delta \mathbf{r} \\ \Delta p_4 &= \delta t(t) - \delta t_0 = \Delta \delta t \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &\underbrace{C^j(t) - \|\mathbf{r}^j(t - \tau^j) - \mathbf{r}_0\| + c\delta t^j(t - \tau^j) - c\delta t_0}_{\text{observado - calculado}} = \\ &= \underbrace{-\mathbf{u}^j|_{\mathbf{r}^j(t - \tau^j), \mathbf{r}_0}}_{\text{calculado}} \cdot \underbrace{\Delta \mathbf{r}(t)}_{\text{3 incógnitas}} + \underbrace{c}_{\text{cte.}} \underbrace{\Delta \delta t(t)}_{\text{1 incógnita}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta C^1(t_1 - \tau^1, t_1) \\ \vdots \\ \Delta C^{n_1}(t_1 - \tau^{n_1}, t_1) \\ \Delta C^1(t_2 - \tau^1, t_2) \\ \vdots \\ \Delta C^{n_2}(t_2 - \tau^{n_2}, t_2) \\ \vdots \\ \Delta C^1(t_m - \tau^1, t_m) \\ \vdots \\ \Delta C^{n_m}(t_m - \tau^{n_m}, t_m) \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} -(\mathbf{u}^1(t_1 - \tau^1))^T & c & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -(\mathbf{u}^{n_1}(t_1 - \tau^{n_1}))^T & c & 0 & \dots & 0 \\ -(\mathbf{u}^1(t_2 - \tau^1))^T & 0 & c & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -(\mathbf{u}^{n_2}(t_2 - \tau^{n_2}))^T & 0 & c & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -(\mathbf{u}^1(t_m - \tau^1))^T & 0 & 0 & \dots & c \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -(\mathbf{u}^{n_m}(t_m - \tau^{n_m}))^T & 0 & 0 & \dots & c \end{pmatrix}}_{\text{matriz de diseño}} \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{r} \\ \Delta \delta t_1 \\ \Delta \delta t_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta t_m \end{pmatrix} \quad (5)$$

utilizó el versor \mathbf{u} de cosenos directores sitio-satélite (en el sistema ECEF).

Inicialización

Las ecuaciones de observación ecuación (4) son acumuladas durante un tiempo de inicialización Δt_{ini} en el cual el vehículo se mantiene estático. El sistema de ecuaciones completo tiene la forma la ecuación (5).

El total de incógnitas será de $m+3$, siendo m el número de épocas, contando las m incógnitas $\Delta \delta t_i$ del reloj del receptor más las tres incógnitas $\Delta \mathbf{r}$ de posición.

Se asume que los errores de observación tienen igual varianza, y que no están correlacionados entre sí, y se resuelve el sistema por el método de cuadrados mínimos. Una vez que se determinaron las incógnitas se calculan los residuos a través de la ecuación (6), donde se han utilizado las definiciones de la ecuación (7).

Cada vector \mathbf{V}_i consiste en los residuos mezclados correspondientes a los satélites registrados en la época t_i . El conjunto total de residuos correspondientes a cada satélite

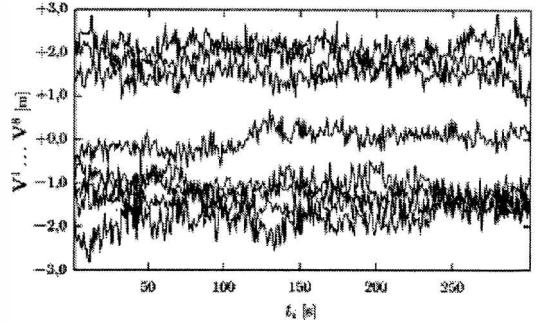


Figura 1. Ejemplo de residuos de inicialización para 8 satélites luego de 5 minutos de inicialización. Se observa claramente la presencia de importantes efectos sistemáticos no modelados (los residuos de cada satélite mantienen un apartamiento sistemático respecto de cero).

registrado a lo largo de la inicialización puede construirse en la ecuación (8) donde k y q , para $j=1,2,\dots, n_{sat}$ son respectivamente la época inicial de registro y el número total de registros correspondientes al satélite SV^j . Se dispone entonces de n_{sat} vectores de residuos \mathbf{V}^j , uno por cada uno de los satélites registrados (Fig. 1).

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{L}_i - \mathbf{A}_i \Delta \mathbf{r} - \mathbf{B}_i \Delta \delta t_i \quad i = 1, 2, \dots, m \tag{6}$$

$$\mathbf{L}_i = \underbrace{\begin{pmatrix} \Delta C^1(t_i - \tau^1, t_i) \\ \vdots \\ \Delta C^{n_i}(t_i - \tau^{n_i}, t_i) \end{pmatrix}}_{(n_i \times 1)} \quad \mathbf{A}_i = \underbrace{\begin{pmatrix} -(\mathbf{u}^1(t_i - \tau^1))^T \\ \vdots \\ -(\mathbf{u}^{n_i}(t_i - \tau^{n_i}))^T \end{pmatrix}}_{(n_i \times 3)} \quad \mathbf{B}_i = \underbrace{\begin{pmatrix} c \\ \vdots \\ c \end{pmatrix}}_{(n_i \times 1)} \tag{7}$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} v_{k^1} \\ v_{k^1+1} \\ \vdots \\ v_{k^1+q^1-1} \end{pmatrix}}_{\mathbf{V}^1}^{SV^1} \quad \underbrace{\begin{pmatrix} v_{k^2} \\ v_{k^2+1} \\ \vdots \\ v_{k^2+q^2-1} \end{pmatrix}}_{\mathbf{V}^2}^{SV^2} \quad \dots \quad \underbrace{\begin{pmatrix} v_{k^{n_{sat}}} \\ v_{k^{n_{sat}}+1} \\ \vdots \\ v_{k^{n_{sat}}+q^{n_{sat}}-1} \end{pmatrix}}_{\mathbf{V}^{n_{sat}}}^{SV^{n_{sat}}} \tag{8}$$

$(q^1 \times 1) \qquad (q^2 \times 1) \qquad \qquad \qquad (q^{n_{sat}} \times 1)$

Modelado de residuos

Los vectores V^j contienen información sobre las deficiencias sistemáticas de modelado al utilizar la ecuación (4). El método desarrollado consiste en modelar numéricamente estos residuos de una manera adecuada para poder mitigar estas deficiencias en las ecuaciones de observación para las épocas $t > t_m$ posteriores al intervalo de inicialización.

Esta forma de modelar los residuos necesariamente es válida para un periodo de tiempo útil luego del cual se espera que los errores sistemáticos dejen de ser adecuadamente corregidos.

Sin embargo es posible plantear un paulatino mejoramiento de la modelización de los residuos analizando los mismos para épocas posteriores al tiempo de inicialización Δt_{mi} .

Para modelar los residuos se utiliza una función simple, que no solo los representa adecuadamente, sino que además se adapta al los fines de extrapolar la información en el tiempo. La función utilizada es lineal (recta) de la forma de la ecuación (9).

Se estiman los coeficientes para cada satélite utilizando el método de cuadrados mínimos y finalmente se cuenta con n_{sat} rectas según la ecuación (10).

Remoción de los errores sistemáticos

Luego del proceso de inicialización las ecuaciones se resuelven en forma instantánea, es decir época a época, permitiendo el guiado del vehículo.

La información contenida en las rectas p^j se incorpora a las ecuaciones de observación linealizadas que entonces toman la forma de la ecuación (11).

La modificación anterior a la ecuación (4) resulta en un significativo aumento en la precisión σ_i de las soluciones instantáneas ya que los parámetros de modelado $\Delta r(t)$ y $\Delta \delta t(t)$ no deben absorber aquellos efectos sistemáticos de primer orden que son removidos de los observables (Fig. 2).

Por otra parte, al disminuir apreciablemente los errores sistemáticos que afectan a las observaciones de cada satélite las soluciones de ecuación (11) se estabilizan respecto de la pérdida de señal de alguno de los satélites registrados, es decir, la pérdida de algún satélite no produce un salto de las coordenadas estimadas.

Suavizado del observable

A fin de disminuir el error en el guiado se construyó un nuevo observable con menor ruido observacional combinando la información contenida en el código C/A con la

$$p^j(t) = a^j(t - t_{k^j}) + b^j \quad j = 1, \dots, n_{sat} \tag{9}$$

$$v_i^j = a^j(t_i - t_{k^j}) + b^j \quad i = \underbrace{k^j, k^j + 1, \dots, k^j + q^j - 1}_{\text{cada época}} \quad j = \underbrace{1, \dots, n_{sat}}_{\text{cada satélite}} \tag{10}$$

$$\underbrace{C^j(t) - \|r^j(t - \tau^j) - r_0\| + c\delta t^j(t - \tau^j) - c\delta t_0 - a^j(t_i - t_{k^j}) - b^j}_{\text{observado} - \text{calculado} - \text{recta}} = \tag{11}$$

$$= -u^j|_{r^j(t-\tau^j), r_0} \cdot \Delta r(t) + c\Delta \delta t(t)$$

$$R^j(t_i) = R^j(t_{k^j}) + \lambda_{L1}(\Phi^j(t_i) - \Phi^j(t_{k^j})) \tag{12}$$

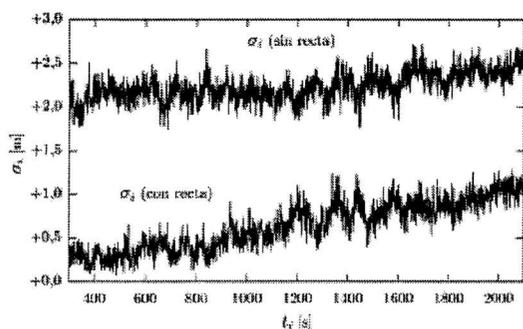


Figura 2. Ejemplo de la precisión $\tilde{\Delta}_i$ de las soluciones instantáneas de las ecuaciones ec. (4) y ec. (11) (mismos datos) luego de una inicialización de 5 minutos. Se observa como $\tilde{\Delta}_i$, al utilizar ec. (4), se mantiene en $\sim 2,5$ m, mientras que modelando los residuos disminuye a menos de 1 m durante 30 minutos.

información contenida en la fase de la portadora L1 $\Phi(t)$ de manera de obtener una pseudo distancia suavizada $R^j(t)$. Esta se define como (Hofmann) ecuación (12), donde λ_{L1} es la longitud de onda de la portadora L1 [m]; Φ es el observable fase [ciclos] y la ecuación (13).

Este método de suavizado presenta el problema de la divergencia código fase. Este error sistemático se debe principalmente a la diferente manera en que el retardo ionosférico afecta a ambos observables. Sin embargo esto

no representa un problema en períodos inferiores a una hora, ya que este error puede modelarse adecuadamente junto con los demás errores sistemáticos analizando los residuos de inicialización.

El error del nuevo observable suavizado resulta del mismo orden que el del observable fase.

Guiado

Las ecuaciones de observación linealizadas toman, para el nuevo observable suavizado definido, la forma de la ecuación (14).

La ecuación (14) reemplaza a la ecuación (4) en el proceso de inicialización, obteniéndose un conjunto de vectores de residuos V' que contienen la misma información acerca de las deficiencias de modelado que resultan al trabajar con la ecuación (4) (mas la divergencia código fase), pero que evidencian la drástica disminución del ruido observacional involucrado.

Se calculan nuevas rectas de corrección y se obtiene la ecuación (15).

La Figura 3 muestra el comportamiento de la precisión σ_i del posicionamiento instantáneo utilizando la expresión original ecuación (4) (denominado a partir de aquí modo de guiado autónomo) y la expresión ecuación (15)

$$R^j(t_{k^j}) = \frac{1}{q^j} \sum_{i=k^j}^{k^j+q^j-1} (C^j(t_i) - \lambda_{L1}(\Phi^j(t_i) - \Phi^j(t_{k^j}))) \quad (13)$$

$$\underbrace{R^j(t) - \|\mathbf{r}^j(t - \tau^j) - \mathbf{r}_0\| + c\delta t^j(t - \tau^j) - c\delta t_0}_{\text{observado suavizado} - \text{calculado}} = -\mathbf{u}^j|_{\mathbf{r}^j(t-\tau^j), \mathbf{r}_0} \cdot \Delta \mathbf{r}(t) + c\Delta \delta t(t) \quad (14)$$

$$\underbrace{R^j(t) - \|\mathbf{r}^j(t - \tau^j) - \mathbf{r}_0\| + c\delta t^j(t - \tau^j) - c\delta t_0 - a^j(t_i - t_{k^j}) - b^j}_{\text{observado suavizado} - \text{calculado} - \text{recta}} = -\mathbf{u}^j|_{\mathbf{r}^j(t-\tau^j), \mathbf{r}_0} \cdot \Delta \mathbf{r}(t) + c\Delta \delta t(t) \quad (15)$$

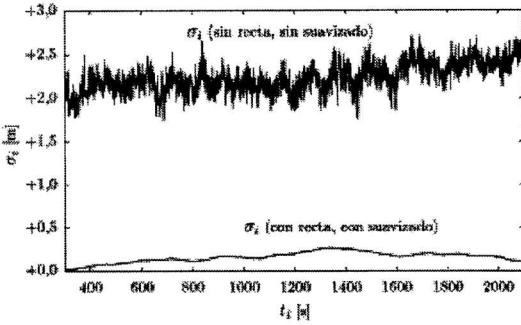


Figura 3. Ejemplo de la precisión σ_i de las soluciones instantáneas de las ecuaciones ec. (4) y ec. (15) (mismos datos). Obsérvese que al modelar los residuos, y utilizar el observable suavizado, permanece por debajo de los 0,3 m

(denominado a partir de aquí modo de guiado autónomo corregido).

Para evaluar el comportamiento del algoritmo en modo cinemático se realizó una comparación entre la trayectoria de un móvil calculada utilizando posicionamiento diferencial cinemático y las trayectorias calculadas utilizando las ecuaciones ecuación (4) (modo autónomo) y ecuación (15) (modo autónomo corregido).

Los datos registrados por un receptor geodésico montado en el vehículo, y los de un segundo receptor geodésico inmóvil en las proximidades, fueron procesados en forma diferencial utilizando el software comercial GPSurvey. La trayectoria horizontal calculada es muy precisa ($\sim 0,02$ m) y permite evaluar perfectamente la deriva en el guiado al utilizar ecuación (4) o ecuación (15) (Fig. 4).

Estos datos fueron elegidos para la comparación por presentar un desplazamiento

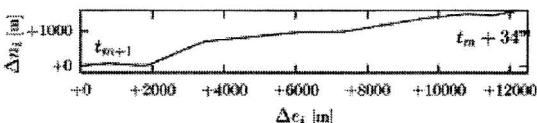


Figura 4. Trayectoria diferencial precisa seguida por el móvil sobre un camino rural. El desplazamiento desde el punto de inicialización es mayor a 12 km, el tiempo de viaje es de 34 minutos.

muy apreciable de ~ 12 km respecto del sitio de inicialización, ya que dentro de los errores sistemáticos que se corrigen se encuentran errores atmosféricos con componentes locales. Es razonable pensar que si las correcciones son aplicadas en un área de trabajo más próxima al sitio de inicialización, lo que ocurriría al guiar maquinaria agrícola sobre un lote, deben permitir un guiado de igual o mejor calidad que el que resulta de esta experiencia.

Se define la deriva horizontal instantánea de las trayectorias autónomas relativas como

$$\Lambda_i = \sqrt{(\Delta e_i - \Delta e_i^d)^2 + (\Delta n_i - \Delta n_i^d)^2} \quad (16)$$

donde $(\Delta e_i, \Delta n_i)$ son los apartamientos al este y al norte del punto origen de la trayectoria y se obtienen a partir de las soluciones de las ecuaciones (4) y (15) y se contrastan con $(\Delta e_i^d, \Delta n_i^d)$ obtenidas a partir de la solución diferencial precisa (las trayectorias autónomas calculadas con las ecuaciones (4) y (15) tienen un origen arbitrario; para contrastarlas con la trayectoria precisa se las traslada hasta hacerlas coincidir, en el instante inicial t_{m+p} con la trayectoria precisa). Las Figuras 5 a 7 muestran el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo y el recorrido.

El software desarrollado es un prototipo para el tratamiento de observaciones de código C/A y fase L1 que alcanza precisiones decimétricas en trayectorias relativas a algún punto de arranque, trabajando en modo autónomo, lo que lo hace potencialmente útil para muchas aplicaciones, en particular para la agricultura de precisión en ausencia de correcciones del tipo DGPS.

Entre las perspectivas de mejoramiento del software se puede señalar:

La experimentación con otras funciones para el modelado de los residuos (incluir por ejemplo la información del ángulo de altura de la visual al satélite) para hacer más robusto este modelado y extender su utilidad en el tiempo.

Sistema GPS de guiado autónomo corregido.

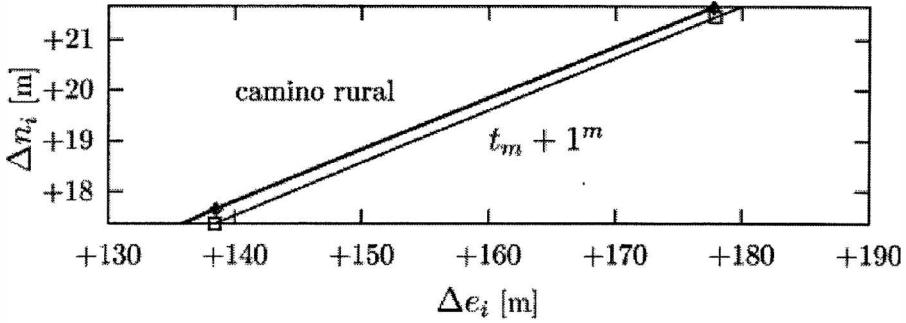


Figura 5. Ampliación de la Figura 4 donde pueden apreciarse la trayectoria autónoma calculada con ec. (4) (%), la trayectoria precisa por posicionamiento diferencial cinemático ($\hat{E}\%$) y la trayectoria autónoma corregida calculada con ec. (15) (+) (estas últimas dos están superpuestas). Se observa que solo algunos segundos después de comenzado el desplazamiento del móvil la trayectoria autónoma presenta una deriva respecto de la trayectoria precisa de $\sim 0,4$ m producto de los errores observacionales (los ejes presentan escalas distintas).

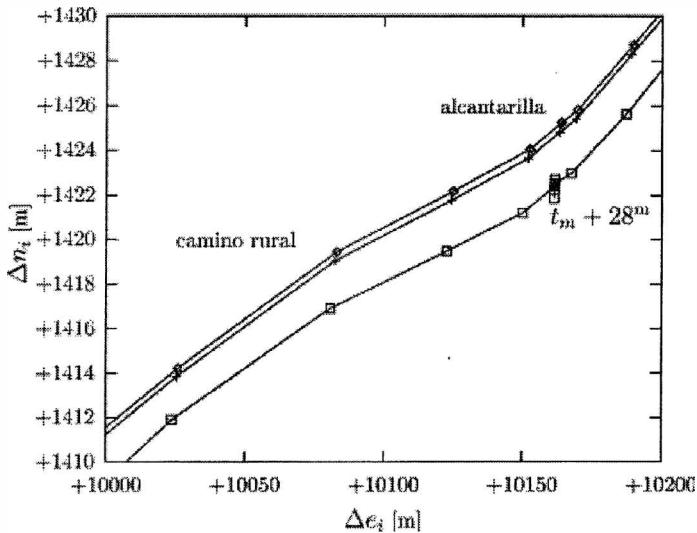


Figura 6. Ampliación de la Figura 4 donde pueden apreciarse la trayectoria autónoma calculada con ec. (4) (%), la trayectoria precisa por posicionamiento diferencial cinemático ($\hat{E}\%$) y la trayectoria autónoma corregida calculada con ec. (15) (+). Se observa que 28 minutos después de la inicialización, y a más de 10 km del sitio de arranque, la trayectoria autónoma corregida presenta una deriva de $\sim 0,7$ m, mientras que la trayectoria autónoma se aparta de la trayectoria precisa ~ 4 m (los ejes presentan escalas distintas).

La incorporación de modelos de corrección para el retardo troposférico y ionosférico debería también mejorar la modelización de los residuos y su validez por un período de tiempo mayor. Una nueva modelización a partir de los residuos en movimiento o de una reinicialización.

REFERENCIAS

Kleusberg A. and Teunissen P. J. G. (Eds.), 1996, GPS for Geodesy, Lecture Notes in Earth Sciences, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, vol. 60.
 Hofmann-Wellenhof B. and Lichtegger H. and Collins J., 1992, Global Positioning System

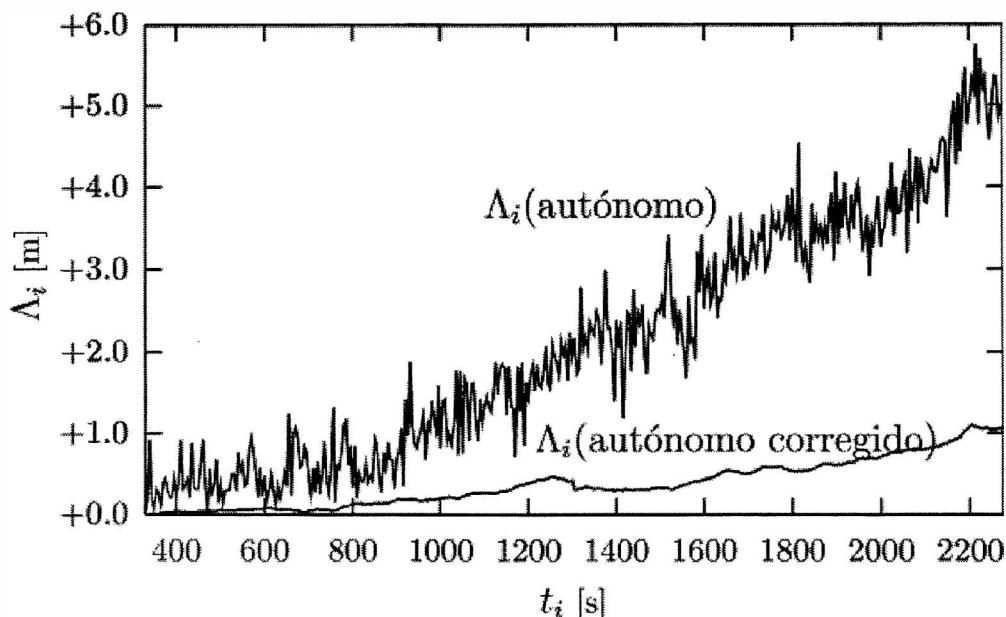


Figura 7. Deriva horizontal en el guiado para las trayectorias calculadas con las ecuaciones ec. (4) (modo autónomo) y ec. (15) (modo autónomo corregido) con inicialización de 5,5 minutos. Puede observarse como luego de 30 minutos, y a más de 12 km del sitio de arranque, la trayectoria autónoma deriva ~5 m, mientras que el modo autónomo corregido resulta en una deriva un 80% menor (~1 m).

Theory and Practice, Springer-Verlag Wien New York.

Leick A., Lambert S., 1990, GPS satellite surveying, Wiley-Interscience publication.

Brunini C., Perdomo R., Brunini A., Usandivaras J., Hormaechea J. L., Pincirolu R., Del Cogliano D., Mayer F., 1988, Seminario GPS '88, FCAG-UNLP.

de Jonge P. J., 1998, A processing strategy for the application of de GPS in networks, Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, vol. 46.

Kleusberg A. and Teunissen P. J. G. (Eds.), 1996, GPS for Geodesy, Lecture Notes in Earth Sciences, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, vol. 60.

Hofmann-Wellenhof B. and Lichtegger H. and Collins J., 1992, Global Positioning System Theory and Practice, Springer-Verlag Wien New York.

Leick A., Lambert S., 1990, GPS satellite surveying, Wiley-Interscience publication.

Brunini C., Perdomo R., Brunini A., Usandivaras J., Hormaechea J. L., Pincirolu R., Del Cogliano

D., Mayer F., 1988, Seminario GPS '88, FCAG-UNLP.

de Jonge P. J., 1998, A processing strategy for the Gurtner W., 2001, RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.10, formato electrónico.

Spoñord P. R. and Remondi B. W., 1989-1991, The National Geodetic Survey Standard GPS Format SP3, formato electrónico.