

# Red GNSS de Castilla y León. Evaluación y rendimiento del servicio RTK en red

Guillermo Martínez Morán (guillermo.martinez@cratos.es)

David A. Nafria García (nafgarda@itacyl.es)

Enrique Lorenzo Herrero (lorheren@itacyl.es)



**Resumen**— El procesado conjunto de los datos GNSS<sup>4</sup> de una red de estaciones de referencia permanentes supone una revolución en las metodologías de trabajo RTK. Antes de comenzar el despliegue de una Red de estaciones es importante evaluar el rendimiento que estas nuevas metodologías proporcionan. En este artículo se exponen las pruebas realizadas en el año 2005 para evaluar el funcionamiento de las redes RTK; se experimentan algunos parámetros que sirven para caracterizar el rendimiento y se muestra el resultado alcanzado con vistas a la implementación de una red de estaciones de referencia en Castilla y León. Gracias a la experiencia adquirida, actualmente (año 2007) la red se encuentra en pleno despliegue, y proporciona ya los servicios de datos en tiempo real y de postproceso. Los datos son accesibles a través de la web <http://gnss.itacyl.es>.

**Palabras Clave**— GNSS, GPS, RTK, Posicionamiento Cinemático Tiempo real, Geodesia, Topografía.

## I. INTRODUCCIÓN

Durante siglos el hombre ha utilizado la información que le proporcionan los astros para posicionarse en la superficie del planeta.

En 1957 los ingenieros de la extinta URSS<sup>1</sup> lanzaron al espacio el primer satélite artificial (*Sputnik*). Este hito en la carrera espacial, puso de manifiesto la posibilidad de conocer en todo momento la posición de un objeto artificial en órbita. Inmediatamente surgió la idea de utilizar astros artificiales como referencia para el posicionamiento en la superficie del globo terrestre. A raíz de esta idea se desarrollaron, durante la década de los 60, el sistema americano TRANSIT y el soviético TSICADA, antecesores del GPS<sup>2</sup> y del GLONASS<sup>3</sup> respectivamente.

Durante la década de los 70 se desarrollaron el GPS y el GLONASS como sistemas militares estratégicos. Sin embargo, el derribo en 1984 de un vuelo comercial de *Korea Airlines* al entrar accidentalmente en el espacio aéreo de la URSS, precipitó la idea norteamericana de hacer uso civil algunas de las prestaciones del sistema GPS. Poco podía sospechar la administración Reagan las repercusiones tecnológicas que en todo el mundo tendría esta decisión.

Varios han sido los ámbitos técnico científicos que se han

visto revolucionados con la introducción de metodologías basadas en sistemas GNSS<sup>4</sup>, pero posiblemente sean la topografía y la geodesia las ciencias más influenciadas por la evolución tecnológica.

El desarrollo de técnicas de procesado diferencial de la señal GNSS, ha permitido exprimir las prestaciones de los sistemas. La precisión nominal para un posicionamiento autónomo del sistema GPS (sin disponibilidad selectiva activada) es de 22 m. en planimetría y 27,7 m. (95% de confianza) en altimetría [1]. Sin embargo, hoy en día y mediante el uso de equipos GPS topográficos de doble frecuencia y técnicas de procesado cinemático en tiempo real (RTK<sup>5</sup>) se alcanzan habitualmente precisiones de 1 cm + 1 ppm (al 68% de confianza) [2].

Si bien estas técnicas nos permiten alcanzar precisiones asombrosas, para las que el GPS posiblemente nunca fue diseñado, adolecen de ciertas limitaciones que entorpecen el trabajo diario en el campo. Entre estas limitaciones podemos destacar:

1. *Falta de homogeneidad en la medida.* Dependiendo de la distancia a la que nos encontremos de nuestra estación de referencia la precisión en la medida obtenida variará, aproximadamente 1 ppm (con un nivel de confianza del 68%) [2].
2. *Falta de cobertura global.* Con los algoritmos actuales de procesado la distancia máxima de la estación de referencia a la que se puede trabajar es de entre 20 y 50 Km [2].

Estas limitaciones pueden ser superadas hoy en día con la instalación de una infraestructura permanente de estaciones de referencia que recabe datos de las constelaciones GNSS constantemente. Procesando todos los datos de forma conjunta en un centro de cálculo es posible proporcionar un servicio homogéneo con una cobertura global en el área abarcada por una infraestructura permanente de estaciones de referencia. Este tipo de infraestructuras son las denominadas *redes RTK* [3].

En la Sección II describiremos brevemente la arquitectura y

<sup>1</sup> **URSS:** Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas

<sup>2</sup> **GPS:** *Global Positioning System*

<sup>3</sup> **GLONASS:** *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*

<sup>4</sup> **GNSS:** *Global Navigation Satellite Systems*

<sup>5</sup> **RTK:** *Real-Time Kinematic*

funcionamiento del sistema. Se explicarán los diferentes conceptos de generación de correcciones existentes hasta el momento, así como los formatos para la transmisión de correcciones.

La Sección III está dedicada al estudio del rendimiento que este tipo de infraestructuras proporciona.

Se describirá la red de estaciones implantada para el desarrollo del estudio, así como los aspectos a evaluar, la metodología seguida para la obtención de datos y el análisis de los resultados.

En la Sección IV se presentarán las conclusiones más relevantes a las que se ha llegado después del estudio y se expondrán algunos aspectos en los que se podría profundizar para conseguir una caracterización más exacta de los sistemas.

El artículo se completa con dos Apéndices en los que se incluirán representaciones gráficas del trabajo realizado.

## II. ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA RTK EN RED

### A. Componentes del sistema

El sistema consta fundamentalmente de 4 segmentos bien diferenciados.

#### 1) Segmento de adquisición de datos

Compuesto por la red de receptores GNSS situados en el área a la que se pretende dar servicio de posicionamiento de precisión. Con las señales disponibles y los algoritmos de procesado actualmente existentes la distancia entre estaciones de referencia debe de ser de aproximadamente 70 Km para asegurar una alta disponibilidad.

#### 2) Red de transmisión de datos

Es el segmento encargado de hacer llegar los datos recogidos por las estaciones de referencia cada segundo al centro de control para su procesado. El requisito más crítico de este enlace de datos es la latencia en la comunicación. Dicha latencia debe ser baja y estable. El tiempo máximo desde que los datos salen del receptor hasta que llegan al centro de control no debe exceder 1 segundo. El ancho de banda del enlace no es un requisito crítico, ya que los datos que se envían ocupan una media de 5.000 bps. Habitualmente se utilizan enlaces ADSL para este tipo de conexiones, si bien no es estrictamente necesario.

#### 3) Centro de control

El cerebro del sistema realiza, entre otros, dos procesos básicos para el funcionamiento de la red RTK.

1. Con los datos recibidos desde las estaciones de referencia calcula un modelo de los errores que afectan a la señal GNSS en la zona.
2. Una vez realizado el modelo de errores, genera una representación informática de los mismos para poder enviárselos a los usuarios en campo.

#### 4) Red de difusión de datos

Se trata del enlace de datos que se utilizará para enviar las correcciones de los errores a los usuarios. La metodología de cálculo y transmisión de errores y correcciones que se

utilice determinará el carácter unidireccional o bidireccional de la comunicación. Tanto el método de cálculo de errores y correcciones como el formato de datos utilizado para la transmisión de los mismos influirán en el ancho de banda necesario en el enlace.

### B. Metodologías de cálculo y transmisión de correcciones y errores

#### 1) Mediante comunicación bidireccional Basadas en el conocimiento de la posición aproximada del usuario por parte del centro de control (BPACC)

Comienza el proceso con el envío de la posición aproximada desde el equipo móvil de campo hasta el centro de control. A partir del modelo de errores que el centro de control calcula se generan correcciones personalizadas para el entorno del usuario. El usuario recibe las correcciones como si una estación de referencia situada a su lado las estuviera generando.

Esta forma de llevar a cabo el cálculo de las correcciones exige la utilización de una red de transmisión de correcciones bidireccional, como puede ser el protocolo de acceso a Internet GPRS de la red de telefonía móvil.

El formato utilizado para la transmisión de las correcciones es el que utilizaría cualquier estación de referencia trabajando de forma individual (RTCM<sup>6</sup> 2.3 o 3.0 [9]).

Este concepto es el empleado por los sistemas comerciales denominados VRS (*Virtual Reference Station*) [4], I-Max [5] y PRS (*Pseudo Reference Station*) [6].

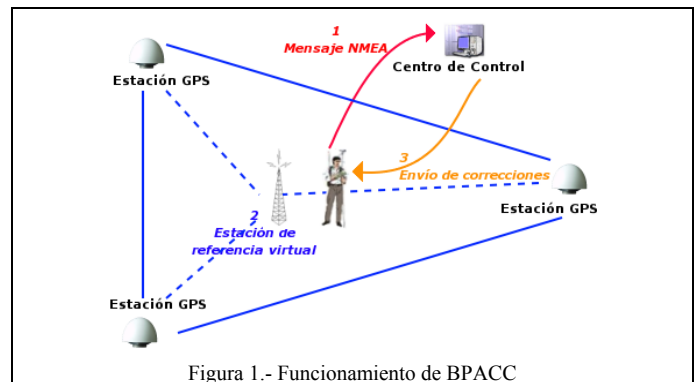


Figura 1.- Funcionamiento de BPACC

#### 2) Mediante comunicación unidireccional Basados en proporcionar información al equipo móvil para que él calcule sus correcciones

En este caso se pueden utilizar dos posibles alternativas de transmisión de datos para corrección de la posición del equipo móvil:

##### a) FKP (*FlächenKorrekturParameter*) [7][8]

Esta metodología aplica el modelo de errores de la zona de trabajo mediante una interpolación lineal de los mismos, tal y como la traducción de sus siglas indica: Parámetros de Corrección Planos.

<sup>6</sup> **RTCM**: Radio Technical Commission for Maritime Services. Estandarizador de facto de formatos de transmisión de correcciones.

Utilizando las estaciones de referencia como puntos donde los errores son conocidos, calcula los parámetros de un plano interpolador. Los parámetros del plano son los que se envían al receptor, el cual se encarga de calcular el valor de la interpolación de los errores para su área de trabajo.

Las correcciones pueden ser transmitidas en este caso mediante un canal de comunicaciones unidireccional, ya que en ellas se encuentra la información necesaria para que el receptor de campo calcule sus propias correcciones a partir de su posición aproximada.

El formato para la transmisión de estas correcciones es el RTCM 2.3, utilizando el mensaje 59 (reservado a formatos propietarios) para transmitir los parámetros del plano de interpolación. No cuenta, por lo tanto, con un formato reconocido como estándar de transmisión, si bien es un estándar de facto.

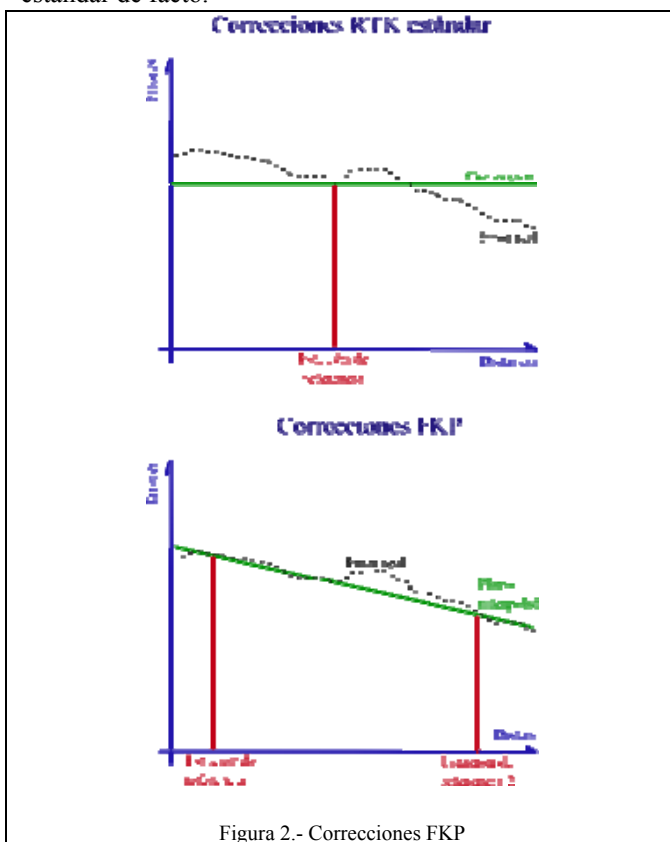


Figura 2.- Correcciones FKP

b) *MAC (Master Auxiliary Concept) [10][11]*

La metodología MAC también proporciona al receptor los datos necesarios para que el instrumento calcule las correcciones correspondientes a su zona de trabajo.

Una de las estaciones de referencia denominada *Master* envía las correcciones en un flujo de datos RTK convencional. Las correcciones de las estaciones denominadas Auxiliares se envían al receptor diferenciadas respecto a las de la estación *Master* para conseguir una reducción en el flujo de datos.

El resultado final es la posibilidad de reconstruir un flujo de datos RTK convencional para cada una de las estaciones de

referencia de la zona. El receptor cuenta por lo tanto con datos suficientes para calcular el modelo de errores en sí mismo. El formato utilizado para transmitir el concepto MAC es el RTCM 3.1, cuyo estándar fue aprobado en Mayo de 2006.

C. *Evolución futura*

Cabe esperar que las redes RTK evolucionen en dos vertientes diferentes. La primera vertiente es aquella que transcurre paralelamente a la evolución de los sistemas GNSS [12][13], y la segunda comprende aspectos inherentes a los modelos de errores y la generación de correcciones [14].

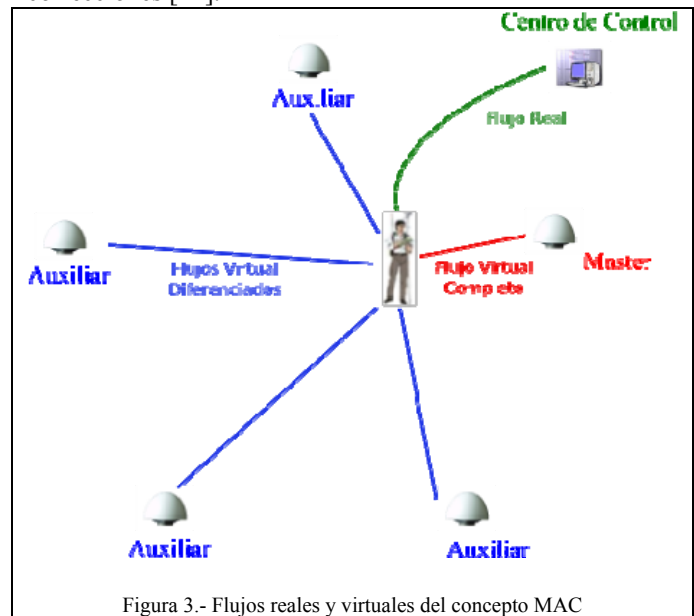


Figura 3.- Flujos reales y virtuales del concepto MAC

La evolución de los sistemas GNSS conlleva un aumento tanto en el número de satélites como en el número de frecuencias y códigos disponibles. Cabría esperar que la modernización en los sistemas provocara que las redes de estaciones de referencia quedaran obsoletas o dejaran de tener sentido. Sin embargo es probable que para conseguir precisiones de 1 centímetro en tiempo real sigamos necesitando utilizar redes terrestres de monitorización. La diferencia más relevante será, probablemente, que estas redes no necesitarán ser tan densas, aumentando la distancia entre estaciones de referencia a 100 Km o más. Por otra parte, al contar con mayor número de satélites, la disponibilidad del servicio aumentará considerablemente. La disponibilidad de un mayor número de frecuencia permitirá que el tiempo medio necesario para resolver ambigüedades se vea reducido.

El modelado de los errores y la generación de correcciones deberán evolucionar hacia esquemas más eficientes. Actualmente se trabaja en el dominio de los observables (pseudo-distancias y ciclos de onda), por lo cual no es posible distinguir la aportación individual de cada una de las fuentes de error. Un esquema basado en un modelado individual de cada fuente de error aportaría grandes beneficios:

- Permitiría adecuar la tasa de refresco del error a cada fuente (ya que no todas tienen la misma

variación con el tiempo). El RTCM 3.1 ya contempla de forma limitada este aspecto, al transmitir a una tasa diferente los errores dispersivos introducidos por la ionosfera y los no dispersivos introducidos por la troposfera.

- Al disponer de un modelado físico de cada error y tener que transmitir solamente los parámetros del modelo, se reduciría el ancho de banda necesario en las comunicaciones. Uno de los mayores obstáculos para dar este paso es la necesidad de un amplio consenso en los modelos físicos a utilizar.

Un modelo de errores fundamentado en estos dos conceptos, permitiría difundir las correcciones a una baja tasa de bits, con una cadencia temporal menor y mediante comunicaciones unidireccionales. Con estas tres premisas sería posible plantearse la utilización de enlaces de datos satelitales para transmitir las correcciones.

### III. EVALUACIÓN Y RENDIMIENTO DE LA TECNOLOGÍA

#### A. Red de evaluación

Para la evaluación del rendimiento de un sistema RTK en red se diseñó e implementó en Castilla y León, durante los meses de julio y agosto de 2005, una red dotada con el número mínimo de estaciones de referencia, número que no ha de ser menor a 5. Se buscó una distribución de las estaciones en centros oficiales de la administración regional, de forma que la distancia entre las ubicaciones posibles resultó ser la máxima recomendada por los fabricantes; incluso alguna línea base fue superior a las especificaciones recomendadas de 70 Km. Esta circunstancia podría parecer en principio una limitación para la experiencia; sin embargo fue considerada una distribución adecuada ya que permitió probar el sistema en condiciones límite. Castilla y León es de una gran extensión territorial, y la distancia entre estaciones de referencia es un aspecto fundamental para el despliegue de una red completa.

Para la instalación y realización de la prueba se contó con la colaboración de las distintas casas fabricantes y distribuidoras de material GNSS topográfico. La red contaba con estaciones de referencia Leica GRX1200 Pro, Topcon Odyssey y Trimble Net-RS. Como softwares de cálculo se recurrió a tres disponibles en el mercado: Spider 2.0 de Leica, GPSNet de Trimble y GNSSmart de GEO++ proporcionado por Topcon España.

Una vez instaladas las antenas en los lugares idóneos se realizó una prueba de calidad de recepción de señales con los datos recogidos por cada una de las estaciones durante 24 horas. Las herramientas utilizadas para obtener la evaluación de calidad fueron el software de análisis TEQC [15] del consorcio UNAVCO<sup>7</sup> y el programa de interpretación gráfica QC2SKY [16]. Todos los emplazamientos contaban al menos con un 95% del horizonte, cuya máscara de elevación era inferior a 10°.

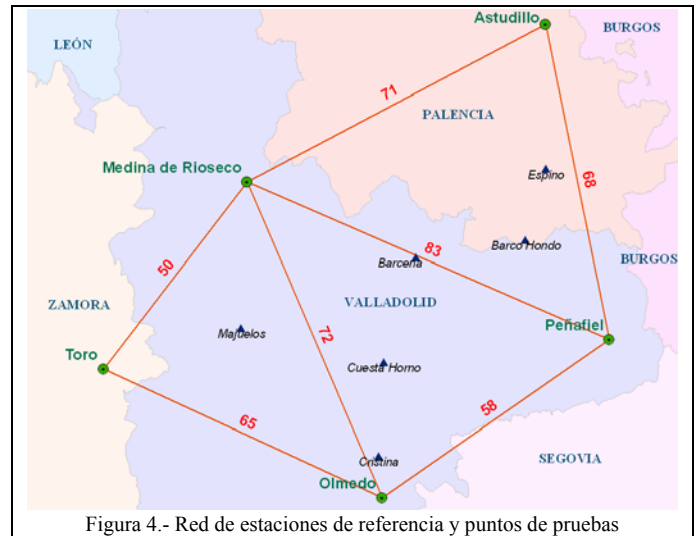


Figura 4.- Red de estaciones de referencia y puntos de pruebas

Uno de los puntos más críticos para el correcto funcionamiento de estos sistemas es el cálculo de las coordenadas de las estaciones de referencia. Para que los sistemas RTK en red funcionen es necesario que el software del centro de control sea capaz de fijar una solución de fase entre las estaciones de referencia. Dicha solución sólo es posible fijarla para todas las estaciones si existe una fuerte coherencia interna en las coordenadas calculadas.

El cálculo se realizó mediante un ajuste libre de las 5 estaciones de referencia con los datos GNSS recogidos durante 2 días completos. Posteriormente se enlazó la red libre al marco de referencia del IGN<sup>8</sup>. Para ello se calcularon las coordenadas absolutas de la estación de referencia de Peñafiel a partir de las estaciones que el IGN [19] tiene en Logroño (RIOJ), Santander (CANT) y Madrid (VILL). Posteriormente se utilizó este punto como punto de anclaje de nuestro ajuste libre al marco de referencia global.

Aunque la metodología seguida para el cálculo de las coordenadas no garantiza una gran precisión absoluta, las coordenadas obtenidas se mostraron suficientes para la realización de las pruebas.

#### B. Aspectos a evaluar

El rendimiento del sistema se ha caracterizado en la experiencia fundamentalmente por 4 parámetros:

- Precisión

Es importante conocer la dispersión en los datos obtenidos de forma que se pueda evaluar la repetitibilidad en las medidas. Este parámetro estará influenciado principalmente por la calidad de las correcciones generadas por el software una vez que éste tiene establecida una solución para la red.

Este parámetro dependerá de muchas variables. Algunas de ellas serán controlables por el operador del sistema, como por ejemplo la distancia entre estaciones y la generación de correcciones que se haya utilizado. Los resultados obtenidos en este estudio, por lo tanto, deben verse bajo el prisma de las circunstancias específicas de la red de evaluación que

<sup>7</sup> UNAVCO: University NAVSTAR Consortium.

<sup>8</sup> IGN: Instituto Geográfico Nacional

hemos empleado.

Otras variables no serán controlables y por lo tanto cualquier implementación de red se verá afectada por ellas; entre tales variables se encuentran la actividad ionosférica y troposférica, si bien la distancia entre estaciones de referencia condiciona la dependencia de la red respecto a estos factores.

La precisión vendrá determinada numéricamente por la desviación estándar de las medidas recogidas.

- Exactitud

La exactitud nos permitirá conocer cuánto se desvían nuestras medidas efectuadas en tiempo real de las coordenadas disponibles para un determinado punto de control. Este parámetro estará influenciado principalmente por las coordenadas asignadas a nuestras estaciones de referencia. Dado que la metodología seguida para el cálculo de las coordenadas de las estaciones no es todo lo precisa que sería deseable, es de esperar que los resultados obtenidos respecto a este parámetro no sean del todo satisfactorios.

La exactitud vendrá determinada numéricamente por la media de la diferencia entre las coordenadas obtenidas por el equipo móvil en tiempo real, y las coordenadas propias del punto de control.

- Tiempo de resolución de ambigüedades

Este parámetro nos determinará el tiempo que tarda el receptor de campo en fijar ambigüedades de fase y posicionarse de forma precisa. Se valorarán dos magnitudes diferentes:

- Tiempo en fijar ambigüedades desde el momento en que se activa el receptor hasta la obtención de posicionamiento preciso. Nos permitirá evaluar en cuánto tiempo puede un usuario con un equipo móvil iniciar su trabajo de campo.
- Tiempo de recuperación del posicionamiento preciso tras una breve pérdida de fase. Nos permitirá evaluar cuánto tarda un usuario en poder continuar trabajando ante una eventual pérdida de fase.

Existe una dependencia directa de estos tiempos con el algoritmo de resolución empleado por el receptor móvil.

- Homogeneidad de las soluciones

Una de las mayores ventajas que son de esperar para este tipo de tecnologías frente al sistema RTK convencional es la independencia que se puede conseguir de las características mencionadas (precisión y tiempo de resolución de ambigüedades) respecto a la distancia del receptor móvil a una estación de referencia.

La homogeneidad en precisión y tiempo de resolución de ambigüedades se evaluará comparando los valores de dispersión y tiempos, respectivamente, en los diferentes puntos de control seleccionados.

### C. Plan de evaluación

Para la evaluación de la red se escogieron los 6 puntos de control que pueden verse en la Figura 4. Estos puntos de prueba corresponden a vértices geodésicos de la red REGENTE [20] del IGN; como coordenadas de control se utilizaron las proporcionadas por el IGN.

Para realizar los cálculos de precisión y dispersión de la medida se utilizaron las coordenadas obtenidas tras proyectar en UTM (huso 30) las coordenadas ETRS89.

Se analizan los resultados que permiten comparar dos softwares distintos y dos conceptos de generación de correcciones entre sí. Se comparan los resultados obtenidos mediante dos softwares diferentes, utilizando las correcciones BPACC (basadas en comunicaciones bidireccionales) con el protocolo de mensajes RTCM v2.3 (mensajes 20 & 21). Por otra parte se compara el rendimiento de dos conceptos diferentes de generación de correcciones: BPACC y FKP.

Las tomas de datos se realizaron de forma manual durante un periodo de tiempo corto en cada uno de los puntos de control ante la imposibilidad de utilizar una estación permanente activa durante un periodo largo de tiempo. Esta limitación implica que los datos recogidos tengan una fuerte correlación temporal, dado que en un determinado momento las condiciones ambientales y la configuración de la constelación son muy concretas y pueden condicionar los resultados.

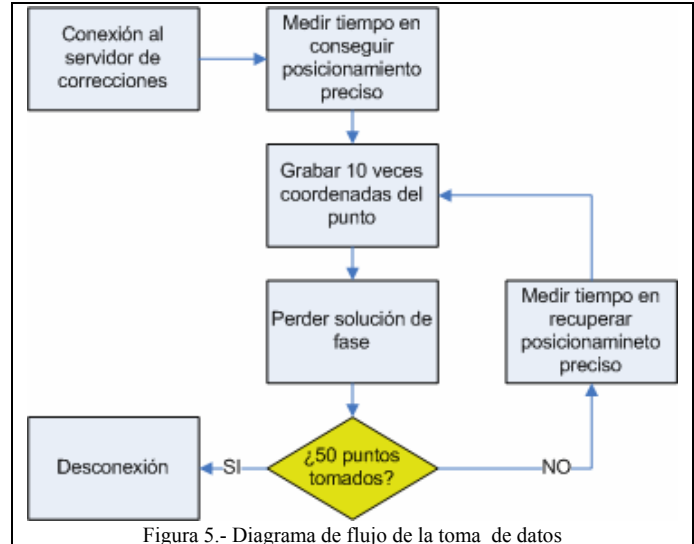


Figura 5.- Diagrama de flujo de la toma de datos

Para intentar eliminar parcialmente esta correlación en las tomas de datos se realizaron dos lecturas en dos días distintos siguiendo el procedimiento que se muestra en la Figura 5.

TABLA I  
CANTIDAD DE DATOS RECOGIDOS

Tipos	Nº para cada serie	Nº total
Tiempo de posicionamiento preciso inicial	1	12
Tiempo de recuperación de posicionamiento preciso	4	48
Coordenadas	50	600

Con la cantidad de datos que se recogieron se pudo llevar a cabo un estudio exhaustivo del rendimiento en precisión y exactitud, si bien los datos referentes a los tiempos de resolución son simplemente ilustrativos.

#### D. Estudio del rendimiento de las soluciones

##### 1) Análisis conjunto de todas las muestras

La Tabla II presenta la estadística obtenida mediante el análisis conjunto de todas las muestras. Dado que los datos han sido obtenidos en lugares y momentos muy distintos se considera que la correlación espacial y temporal de las medidas es mínima.

En los resultados mostrados en la Tabla II y en las gráficas del Apéndice A cabe destacar el sesgo que se aprecia en la media de las diferencias independientemente del software o el concepto de las correcciones. Las muestras no se distribuyen uniformemente alrededor de las coordenadas proporcionadas por el IGN tal y como sería de esperar. Este sesgo afecta a la exactitud del sistema.

El sesgo en planimetría puede tener su explicación en la metodología seguida para la asignación de coordenadas a las estaciones de referencia. Utilizando el método descrito en la Sección III.A es muy posible que las coordenadas de la estación utilizada como anclaje estén desplazadas y, por lo tanto, el resto de la red.

TABLA II  
ESTADÍSTICA DE TODAS LAS MUESTRAS RECOGIDAS

	Software A (BPACC)	Software B (BPACC)	Software B (FKP)
$\sigma$	X (m)	0,011	0,009
	Y (m)	0,011	0,013
	h. elipsoidal (m)	0,030	0,030
$P_{95}$	X (m)	0,014	0,015
	Y (m)	0,023	0,027
	h. elipsoidal (m)	0,054	0,052
$\mu$	X (m)	0,011	0,013
	Y (m)	0,011	0,009
	h. elipsoidal (m)	-0,093	-0,044
t	Inicialización (s)	25	30
	Recuperación (s)	10	10

$\sigma$ = Desviación estándar de la medida

$P_{95}$ = Dispersión de medidas al 95%

$\mu$ = Media de la diferencia muestra<sub>UTM</sub>-control<sub>UTM</sub>

t= Tiempo en resolución ambigüedades

sesgo resultante es inferior a ese valor.

Los dos motivos antagónicos expuestos implican que no sea posible asegurar, con los datos recogidos, si nuestra red está desplazada en planimetría, o si por el contrario está correctamente calculada y el sesgo detectado entra dentro del margen de tolerancia de la red REGENTE. En cualquier caso el valor de la inexactitud no sería excesivamente elevado en planimetría.

El sesgo en altimetría es superior al observado en planimetría. Cabría emplear el mismo argumento referido al cálculo de las coordenadas de las estaciones de referencia que se utilizó en planimetría. Sin embargo un análisis más detallado de los datos nos muestra que existe una diferencia significativa de 0,05 m entre el sesgo del software A y el del software B, a pesar de contar ambos con las mismas coordenadas para las estaciones de referencia.

La razón para esta anomalía hay que buscarla probablemente en las calibraciones de las antenas [21][22][23] de las estaciones de referencia introducidas para cada uno de los softwares. No se pudieron introducir las mismas calibraciones ya que los formatos de datos de calibración eran incompatibles entre ambos softwares.

El parámetro de calibración de las antenas que más influye en los observables de fase medidos es el PCV<sup>9</sup> para L1 y L2, que normalmente cambia en varios centímetros la medida en altura. El software de red debe ser capaz de gestionar la existencia de diversos modelos de antena, con diferentes PCV.

Para ello son importantes dos aspectos:

1. Las calibraciones de las antenas introducidas en el software deben ser coherentes. Existen calibraciones realizadas por diferentes organizaciones y casas comerciales. Para que el software pueda trabajar de forma consistente es importante que todas las calibraciones introducidas en el software hayan sido calculadas por la misma entidad utilizando el mismo procedimiento.
2. Generar las correcciones según un modelo de NULLANTENNA [21], de forma que el receptor de campo no tenga que preocuparse por el modelo de antena origen de las correcciones.

Desde el momento que no se ha introducido la misma calibración en ambos softwares es de esperar que existan diferencias, sobre todo en altura, ya que es en valor más afectado por el PCV.

A la vista de los valores obtenidos parece que la calibración introducida en el software B es más acertada y proporciona un valor en altura que entra dentro del margen de tolerancia de la red REGENTE.

No obstante es destacable el hecho de que si se considera la desviación estándar de la red REGENTE en 0,05 m [20], el

<sup>9</sup> **PCV**: Phase Center Variation

### 2) Análisis comparativo entre puntos de control

Analizando comparativamente los resultados obtenidos en diferentes puntos de control se pueden obtener conclusiones sobre la homogeneidad en el rendimiento que este tipo de sistemas proporciona. Se recogen en este documento las conclusiones más relevantes, así como la comparativa entre dos puntos de control seleccionados.

La homogeneidad en la precisión se puso de relevancia al comparar la desviación estándar de los diferentes puntos de control y constatar que la misma no variaba más de 0,01 m en planimetría y 0,03 m en altimetría independientemente de la distancia a la estación de referencia más próxima. La homogeneidad en las soluciones proporcionada por ambos softwares era muy similar sin que existieran diferencias relevantes.

La homogeneidad en el tiempo de resolución de ambigüedades no mostró un comportamiento tan nítido y no se pudieron alcanzar conclusiones significativas, ya que el número de muestras del que se disponía era insuficiente.

La Tabla III recoge los indicadores estadísticos de dos puntos de control, Cristina y Cuesta del Horno, situados a 9 y 29 km, respectivamente, de la estación de referencia más cercana, que era la de Olmedo.

La homogeneidad de la red queda ilustrada comparando la desviación estándar y observando cómo ésta prácticamente no varía para las soluciones BPACC alcanzadas en Cristina y las alcanzadas en Cuesta del Horno.

El Apéndice B representa las gráficas de las muestras correspondientes a los datos recogidos en la Tabla III.

### 3) Comparación entre RTK convencional y RTK en red

Utilizando los datos recogidos en la Tabla III se puede realizar una comparación entre el rendimiento de una solución de red y de una solución obtenida en RTK convencional.

Comparando la dispersión (desviación estándar y  $P_{95}$ ) de la solución BPACC para los dos vértices se puede observar cómo prácticamente permanece constante.

Las medidas de dispersión en Cristina son similares tanto para la solución de red como para la solución RTK convencional ya que nos encontramos a una distancia adecuada para el RTK convencional. Sin embargo en Cuesta del Horno la dispersión del RTK convencional ha aumentado en aproximadamente 1 ppm, que en 30 km supone alrededor de 3 cm.

Se constata efectivamente que la solución de red proporciona un comportamiento más homogéneo en precisión del que tiene el RTK convencional.

Como comentario ilustrativo, se observa cómo los tiempos de resolución de ambigüedades son prácticamente iguales en el caso del RTK convencional y del RTK en red. No

obstante se requeriría el análisis de una mayor cantidad de datos de tiempos para llegar a conclusiones significativas.

TABLA III  
COMPARATIVA DE DOS PUNTOS DE CONTROL

		Cristina (9km)	Cuesta del Horno (29 km)	
$\sigma$	BPACC Software A	X (m)	0,004	0,003
		Y (m)	0,011	0,006
		h. elipsoidal (m)	0,012	0,011
$\sigma$	RTK convencional	X (m)	0,004	0,029
		Y (m)	0,004	0,020
		h. elipsoidal (m)	0,010	0,029
$P_{95}$	BPACC Software A	X (m)	0,006	0,006
		Y (m)	0,028	0,014
		h. elipsoidal (m)	0,022	0,023
$P_{95}$	RTK convencional	X (m)	0,007	0,039
		Y (m)	0,008	0,041
		h. elipsoidal (m)	0,020	0,127
$\mu$	BAPCC Software A	X (m)	0,015	0,013
		Y (m)	0,009	0,017
		h. elipsoidal (m)	-0,103	-0,095
$\mu$	RTK convencional	X (m)	0,014	0,007
		Y (m)	0,009	0,017
		h. elipsoidal (m)	-0,049	-0,046
t	BPACC Software A	Inicialización (s)	20	32
		Recuperación (s)	6	11
	RTK convencional	Inicialización (s)	20	31
		Recuperación (s)	6	10

$\sigma$ = Desviación estándar de la medida

$P_{95}$ = Dispersión de medidas al 95%

$\mu$ = Media de la diferencia muestra<sub>UTM</sub>-control<sub>UTM</sub>

t= Tiempo en resolución ambigüedades

## IV. CONCLUSIONES

Se ha podido comprobar cómo las prestaciones de precisión y tiempo de resolución de ambigüedades ofrecidas por los sistemas RTK en red es similar a la que se alcanza utilizando RTK convencional. Sin embargo una solución RTK en red proporciona una mayor homogeneidad en la precisión y una cobertura global del territorio.

El rendimiento de las soluciones RTK en red se muestra suficientemente bueno para su aplicación en proyectos de topografía e ingeniería donde habitualmente se utilizan sistemas RTK convencionales. Adicionalmente su homogeneidad y cobertura global permiten que se puedan desarrollar metodologías de trabajo más cómodas y productivas que las utilizadas hasta ahora.

Se ha podido ver cómo la exactitud en la medida alcanzada en la red de pruebas se ha mostrado bastante alta, aún cuando el método seguido para el cálculo de coordenadas de las estaciones de referencia no garantizaba a priori una gran exactitud. De hecho la exactitud en planimetría para

nuestras medidas está dentro del margen de incertidumbre de las coordenadas de control utilizadas.

En altimetría se ha detectado una diferencia sustancial entre las medidas proporcionadas por cada uno de los softwares, concluyendo que el sesgo detectado sea debido, muy posiblemente, a las diferencias en la calibración de las antenas que cada software aplica.

La comparación entre distintos conceptos de generación de correcciones no ha revelado grandes diferencias en el rendimiento. No obstante existen otros aspectos a tener en cuenta a la hora de elegir cada una de las tecnologías, como son el canal de comunicación con el equipo de campo (unidireccional o bidireccional) y el ancho de banda necesario para transmitir los datos.

En general los resultados obtenidos cumplen las expectativas puestas en este tipo de sistemas a pesar de que la distancia entre estaciones de referencia está en el límite o incluso por encima de las recomendaciones hechas por los desarrolladores de los softwares. Hay que destacar que la época en la que se realizaron las pruebas se corresponde con un mínimo en el ciclo de actividad solar [24][25], lo cual influye en la velocidad de cambio de la ionosfera y por lo tanto en la distorsión que las medidas GNSS sufren y en la distancia a la que se pueden resolver ambigüedades de fase. Podría ocurrir que una red tan poco densa como la utilizada en este estudio presentase una baja disponibilidad de solución de red en épocas de mayor actividad solar.

Durante la realización de este estudio se detectó que el software A perdía la solución en ocasiones, mientras que el software B la mantenía constantemente. Es de esperar que ante un entorno ambiental más complicado, como el de alta actividad solar, el software A perdiera más a menudo la solución y quizá el software B la perdiera en ocasiones.

Existen diversos aspectos sobre las redes de estaciones de referencia que no se han estudiado en este trabajo y que resultan de especial interés.

Todos los puntos de control que hemos utilizado en este estudio se encuentran dentro de la zona de cobertura de la red de estaciones de referencia. Cabe preguntarse qué ocurrirá con los puntos que se encuentren fuera de la zona de cobertura. A qué distancia del contorno de una red de estaciones de referencia, en su exterior, podemos utilizar las correcciones de la red y esperar unos resultados en posicionamiento y tiempo de resolución de ambigüedades adecuados. De esta forma se dispondría de una valiosa información para dimensionar adecuadamente una red que pretenda cubrir un territorio determinado. Algunos trabajos al respecto se recogen en [26], si bien sería de gran utilidad extenderlos.

El número de muestras del tiempo de resolución de ambigüedades recogidas en nuestro estudio, no permiten alcanzar resultados concluyentes al respecto. Un estudio más exhaustivo que incluyera más muestras y una

comparación entre receptores de campo permitiría evaluar la homogeneidad de la red en este aspecto.

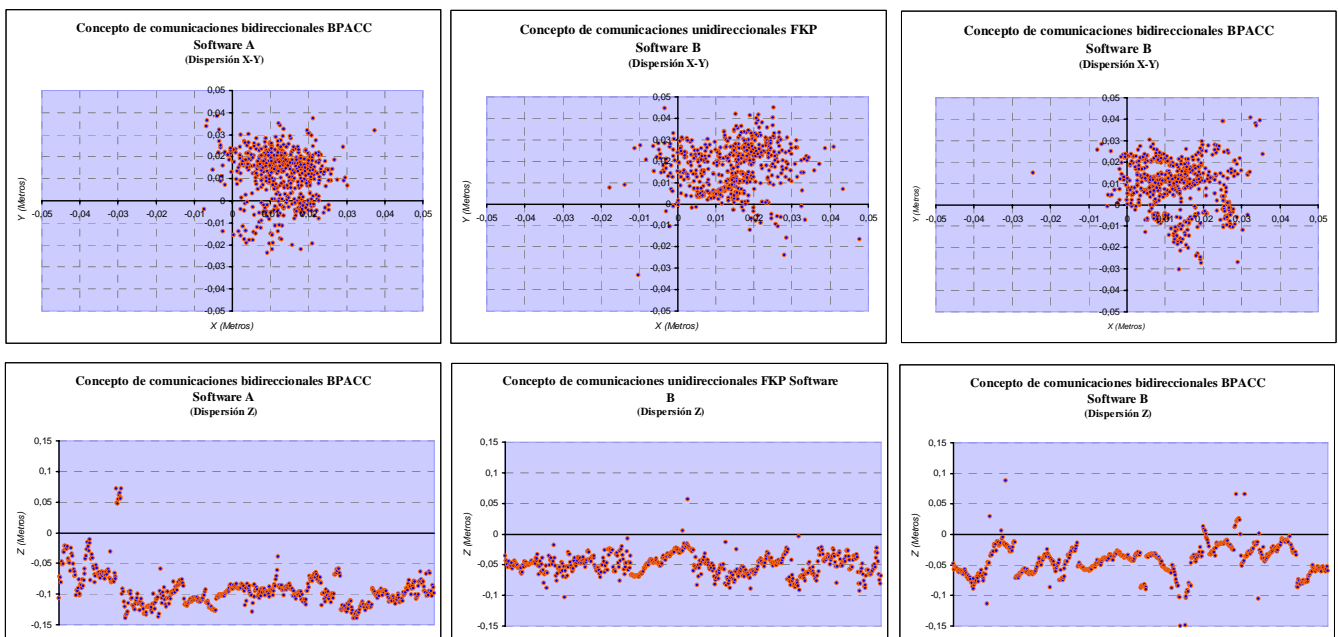
## REFERENCIAS

- [1] Elliott D. Kaplan and Christopher Hegarty, *Understanding GPS: Principles and Applications*, 2<sup>nd</sup> Edition, Northwood: Artech House, 2006. ISBN: 1-58053-894-0
- [2] Jan Van Sickle, *GPS for Land Surveyors*, 2<sup>nd</sup> Edition, London: Taylor & Francis, 2001. ISBN: 0-415-29962-4
- [3] Rizos C. and Han S., "Reference Station Network Based RTK Systems – Concepts and Progress", [www.gmat.unsw.edu.au](http://www.gmat.unsw.edu.au), 2002. [PDF]. Disponible: [www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/rizos\\_etal2002a.pdf](http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/rizos_etal2002a.pdf). [Última visita: Septiembre 2006].
- [4] Landau H., Vollath U. and Chen X., "Virtual Reference Station Systems", *Journal of Global Positioning Systems* Vol. 1, No. 2: 137-143, 2002. [PDF]. Disponible: <http://trl.trimble.com/docshare/dsweb/Get/Document-183157/Virtual%20Reference%20Station%20Systems%20JGPS.pdf>. [Última visita: Septiembre 2006].
- [5] Leica GPS Spider Brochure, Leica Geosystems. [PDF]. Disponible: <http://www.leica-geosystems.com/common/shared/downloads/inc/downloader.asp?id=5131>. [Última Visita: Septiembre 2006]
- [6] Wübbena G., Bagge A. y Schmitz M., "GNSS Irregularity Readings for Distance Dependent Errors", White Paper. Julio 2004. [PDF]. Disponible: [http://www.geopp.de/download/wp\\_irregularity.pdf?PHPSESSID=63f4a08ab634644b718dbaf902409c52](http://www.geopp.de/download/wp_irregularity.pdf?PHPSESSID=63f4a08ab634644b718dbaf902409c52). [Última Visita: Septiembre 2006]
- [7] Wübbena G., Bagge A. y Schmitz M., "RTK Networks based on Geo++ GNSS – Concepts, Implementation, Results", [www.geopp.de](http://www.geopp.de), presentado en *International Technical Meeting, ION GPS-01, September 11.-14.*, 2001. Disponible: [http://www.geopp.de/download/ion2001-gnsmart\\_p.pdf](http://www.geopp.de/download/ion2001-gnsmart_p.pdf). [Última visita: Septiembre 2006].
- [8] Wübbena G. y Bagge A., "RTCM Message Type 59-FKP for transmission of FKP", Geo++ GmbH, 2006. Disponible: <http://www.geopp.de/download/geopp-rtcm-fkp59-1.1.pdf>. [Última Visita: Septiembre 2006]
- [9] Wübbena G., Schmitz M. y Bagge A., "Real-Time GNSS Data Transmission Standard RTCM 3.0", presentado en el *IGS Workshop 2006*. Disponible: <http://nng.esoc.esa.de/ws2006/REAL2.pdf>. [Última visita: Septiembre 2006]
- [10] Euler H.-J., Keenan C.R., Zebhauser C.B., Wübbena G., "Study of a Simplified Approach in Utilizing Information from Permanent Reference Station Arrays", presentado en el *ION GPS 2001*. Disponible: [http://www.geopp.de/download/ion2001-rtcm\\_p.pdf](http://www.geopp.de/download/ion2001-rtcm_p.pdf). [Última visita: Septiembre 2006]
- [11] Euler, H.-J., Seeber, S., Zelzer, O., Takac, F., Zebhauser, B.E., "Improvement of Positioning Performance Using Standardized Network RTK Messages", presentado en *ION NTM 2004*.
- [12] Chen X., Vollath U., Landau H., Sauer K., "Will GALILEO/Modernized GPS Obsolete Network RTK?", Trimble Terrasat GmbH, 2006. Disponible: <http://trl.trimble.com/dscgi/ds.py/Get/File-188903/GNSS%202004%20-%20Galileo%20and%20GPS%20L5%20Obsolete%20Network%20RTK.pdf>. [Última Visita: Septiembre 2006]
- [13] Wübbena, G., "The influence of new and modernized GNSS positioning within RTK networks", presentado en *ALLSAT OPEN Conference, Hannover*, Junio 2006. Disponible: [http://gps.losangeles.af.mil/jpo/ALLSAT/Presentations/07\\_Gerhard\\_Wuebbena\\_Geopp\\_GmbH.pdf?search=%22The%20influence%20of%20new%20and%20modernized%20GNSS%20on%20positioning%20within%20RTK%20networks.%22](http://gps.losangeles.af.mil/jpo/ALLSAT/Presentations/07_Gerhard_Wuebbena_Geopp_GmbH.pdf?search=%22The%20influence%20of%20new%20and%20modernized%20GNSS%20on%20positioning%20within%20RTK%20networks.%22). [Última Visita: Septiembre 2006]
- [14] Wübbena G., Schmitz M., Bagge A., "PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks", presentado en el *ION GNSS 2005*, Septiembre 2005. Disponible: [http://www.geopp.de/download/ion2005\\_fw.pdf](http://www.geopp.de/download/ion2005_fw.pdf). [Última Visita: Septiembre 2006]
- [15] TEQC Software. <http://facility.unavco.org/software/teqc/teqc.html>. [Última Visita: Septiembre 2006]



- [16] QC2SKY Software. <http://www.vercelli.polito.it/civili/topo0105.htm>  
[Última Visita: Septiembre 2006]
- [17] GAMIT Software. <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/>  
[Última Visita: Septiembre 2006]
- [18] BERNESE Software. <http://www.aiub.unibe.ch/bernese.html>  
[Última Visita: Septiembre 2006]
- [19] Repositorio RINEX del proyecto ERGPS del IGN.  
Disponible: <ftp://ftp.geodesia.ign.es/ERGPS/>
- [20] Sitio WEB sobre la red geodésica REGENTE. Disponible:  
[http://www.fomento.es/MFOM/LANG\\_CASTELLANO/DIRECCIONES\\_GENERALES/INSTITUTO\\_GEOGRAFICO/Geodesia/red\\_geodesicas/regente.htm](http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Geodesia/red_geodesicas/regente.htm)  
[Última Visita: Septiembre 2006]
- [21] Menge F., Schmitz M., “Absolute Phase Center Variations”, Geo++ GmbH, 2001. Disponible:  
[http://www.geopp.de/media/docs/AOA\\_DM\\_T](http://www.geopp.de/media/docs/AOA_DM_T)  
[Última Visita: Septiembre 2006]
- [22] Wübbena G., Schmitz M., Menge F., Böder V., Seeber G., “Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real Time”, *presentado en el ION GPS 2000*, Septiembre 2000. Disponible:  
[http://www.geopp.de/download/ion2000\\_presented\\_at.pdf](http://www.geopp.de/download/ion2000_presented_at.pdf)  
[Última Visita: Septiembre 2006]
- [23] Wübbena G., Menge F., Schmitz M., Seeber G., Völkens C., “A new Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations”, *presentado en el ION GPS 1996*. Disponible:  
<http://www.geopp.de/download/ion96.pdf>  
[Última Visita: Septiembre 2006]
- [24] Phillips T., “Solar minimum has arrived”, NASA Science, 2006. Disponible:  
[http://science.nasa.gov/headlines/y2006/06mar\\_solarminimum.htm](http://science.nasa.gov/headlines/y2006/06mar_solarminimum.htm)  
[Última Visita: Septiembre 2006]
- [25] NASA Space Environment Center. Disponible:  
<http://www.sec.noaa.gov>  
[Última Visita: Septiembre 2006]
- [26] Afonso A., “1st RTK Network in Portugal”, Instituto Geográfico de la Armada de Portugal, *presentado en el GPSNet User Seminar of Trimble 2006, Munich*.

## APÉNDICE A



## APÉNDICE B

