

# Detección de burbujas de plasma en la ionosfera ecuatorial Africana

Ana PORTILLO<sup>1</sup>, Miguel HERRAIZ<sup>1</sup> y Sandro María RADICELLA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Geofísica y Meteorología  
Universidad Complutense, Madrid, España,  
anportil@fis.ucm.es, mherraiz@fis.ucm.es.

<sup>2</sup> Aeronomy and Radiopropagation Laboratory  
International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italia  
rsandro@ictp.it.

(Recibido, 1 febrero 2008; recibido en forma revisada, 15 febrero 2008; aceptado, 23 febrero 2008)

## RESUMEN:

Las burbujas de plasma en la ionosfera ecuatorial (EPBs, del inglés: “Equatorial Plasma Bubbles”) son disminuciones en la densidad electrónica generadas por el mecanismo de inestabilidad de Rayleigh-Taylor en el sector nocturno ecuatorial. Provocan cambios rápidos tanto en amplitud como en fase de las señales de radio que la atraviesan, dando lugar a centelleo y degradando las comunicaciones y las señales de navegación, de ahí el interés por su estudio.

En este trabajo se describe la metodología desarrollada para detectar EPBs utilizando medidas de contenido electrónico total oblicuo (sTEC). El procedimiento se basa en eliminar la tendencia con el tiempo de los datos originales, e identificar disminuciones rápidas. También permite estimar el tamaño de las EPBs, midiendo la amplitud de la variación.

Como ejemplo, se muestran los resultados obtenidos al aplicar este método a las medidas disponibles de sTEC desde las estaciones africanas de las redes EGNOS (BRAZ, DOUA, LOME, y NDJA) e IGS (ASC1, MALI, y NKLK) durante 2004. Con la intención de caracterizar la dependencia estacional, se analiza la evolución temporal del número de burbujas detectadas por mes, y los promedios mensuales del tamaño de la disminución en sTEC, en cada estación. También se localizan geográficamente estimando las coordenadas de los puntos subionosféricos asociados, como primera aproximación, y recuperando el tiempo local de su ocurrencia.

**Palabras clave:** Burbujas ionosféricas; Ionosfera Ecuatorial; contenido electrónico total oblicuo; punto subionosférico.

## ABSTRACT:

Equatorial plasma bubbles (EPBs) are ionospheric plasma density field-aligned depletions that grow from irregularities caused by the generalized Rayleigh-Taylor instability mechanism in the post-sunset equatorial sector. The interest of studying EPBs is explained because plasma density depletions generate rapid changes in both amplitude and phase of the radio signals that go through the bubble producing ionospheric scintillations that degrade communications and navigation signals.

We describe herein a methodology implemented to detect EPBs using slant total electron content (sTEC) by means of subtracting their trend against Universal Time from the original data. This procedure allows us to estimate EPBs size by measuring the amplitude variation in the resulting graphs.

As a case of study, we present the results obtained by applying this method to the available calibrated data of sTEC from EGNOS Test Bed (BRAZ, DOUA, LOME, and NDJA) and IGS (ASC1, MALI, and NKLG) stations with the aim of detecting plasma bubbles in the African equatorial region during 2004. In order to characterize their seasonal dependence in each station, we analyse the temporal evolution of the number of detected bubbles per month in each station, and the monthly sTEC depletion size averages. In addition, we are able to locate each bubble both geographically and temporally by estimating the coordinates of its associated pierce point, as first approximation, and retrieving the local time of their occurrence.

**Keywords:** Ionospheric bubbles; Equatorial ionosphere; slant Total Electron content; pierce point.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las burbujas de plasma que aparecen en la ionosfera ecuatorial son regiones de gran extensión con densidad electrónica menor que la del medio que las rodea. Se generan en el sector nocturno de la región ecuatorial de la capa F a partir de irregularidades y ascensos de plasma, cuando estos evolucionan de forma no lineal según el mecanismo de inestabilidad de Rayleigh-Taylor (RTI). Para que se inicie esta inestabilidad, deben darse varias condiciones en la ionosfera en relación con el fenómeno del equatorial spread F, siendo su aparición más probable cuanto más densa sea la capa F y mayores sean los movimientos ascensionales. Por el contrario, los movimientos descendentes y los vientos meridionales estabilizan la región, evitando la formación de burbujas (Abdu, 2005).

También la actividad geomagnética influye en la aparición de estas estructuras, que se detectan con facilidad en las fases inicial y principal de tormentas (Huang et al., 2001). Durante la fase de recuperación, las EPBs disminuyen en el sector nocturno y se incrementan en el diurno. También se registran en presencia de cambios bruscos y acusados en el índice Dst.

Las burbujas han sido objeto de estudio desde hace décadas, utilizando para ello una gran variedad de técnicas de observación, como el radar (Woodman and LaHoz, 1976), el análisis de ionogramas (Whalen, 1997), detección de airglow (Mendillo & Baumgardner, 1982; Pimenta et al., 2003), o medidas in situ tomadas desde satélites (McClure et al., 1977; Huang et al., 2001). También la red global de posicionamiento por satélite GPS proporciona información para estudiar estas irregularidades sobre grandes extensiones de manera simultánea, analizando las frecuencias L1 y L2 (Aarons et al., 1996; Pi et al., 1997), o bien relacionando las disminuciones en sTEC con el centelleo (Kintner & Ledvina, 2005; Gwal et al., 2005).

Todos estos métodos tienen sus limitaciones. La detección del airglow, por ejemplo, se complica en presencia de nubes y llega incluso a hacerse imposible si hay luna llena. Por otro lado, el radar sólo da información de una región de pequeñas dimensiones. Por el contrario, el sistema GPS ofrece observaciones continuas de la generación y evolución de irregularidades de plasma a gran escala, gracias a su funcionamiento permanente y a su cobertura, casi global.

El interés en el estudio de estas estructuras se debe, principalmente, a su influencia perjudicial sobre los sistemas de observación, ya que las EPBs dan lugar a cambios rápidos tanto en amplitud como en fase de las señales de radio

cuando se propagan en su interior, produciendo centelleo y degradando así las señales de navegación y las comunicaciones. Los estudios de centelleo son necesarios para elaborar modelos predictivos que permitan evitar estos efectos negativos sobre los sistemas de observación (Groves et al., 1997), por lo que es muy importante mejorar nuestro conocimiento de estas irregularidades (Dandekar & Groves, 2004).

A pesar de que existe una gran cantidad información de burbujas detectadas en India y en América, otras regiones ecuatoriales carecen de este tipo de estudios. Este es el caso de África, que es estudiada en este trabajo con la intención de estimar los efectos potenciales de las EPBs en el funcionamiento de los sistemas de posicionamiento. El método utilizado para detectar burbujas analiza el contenido electrónico total oblicuo entre la estación y el satélite, por lo que se ha intentado tener el mayor número de enlaces satélite-estación, y por ello se han utilizado tanto estaciones de la red IGS (International GNSS Service) como de la red EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service). En este trabajo se han procesado los datos correspondientes al año 2004.

## 2. MÉTODO

El procedimiento para detectar EPBs tiene en cuenta la física del fenómeno. En efecto, cuando el rayo que une el satélite con la estación en tierra atraviesa una burbuja, el TEC disminuye bruscamente, recobrándose una vez que el rayo vuelve al medio con densidad normal. Por lo tanto, una disminución rápida (en el sentido que el TEC puede recuperarse) en un registro de contenido electrónico puede indicar que el rayo ha atravesado una región de baja densidad. La finalidad del método es detectar y aislar estas disminuciones, para lo que en primer lugar es necesario obtener las variaciones en el sTEC. Para ello, se asume que las medidas del sTEC en un mismo arco satélite-estación se comportan como una serie temporal, de manera que las variaciones se pueden estimar eliminando la tendencia de la serie de medidas. A su vez, la tendencia de la serie viene dada por el promedio móvil a 90 minutos (Portillo et al., 2008).

Para descartar aquellos casos en los que la anomalía sea provocada por otros fenómenos capaces de incrementar la densidad del plasma, como por ejemplo los TIDs, se impone la condición de que no se alcancen valores de TEC superiores a los detectados antes de atravesar la anomalía. Para ello se establecen dos umbrales; uno para las diferencias negativas y otro para las positivas, siendo respectivamente:  $\delta = -5$  TECus y  $\psi = +5$  TECus. Para establecer estos valores se ha considerado que 1) deben asegurar que la disminución sea debida a la presencia de una EPB, y 2) deben generar una anomalía suficientemente grande.

Antes de considerar estos umbrales, el algoritmo detecta los cambios de signo en las variaciones y calcula los máximos y mínimos locales en las regiones positivas y negativas, respectivamente. Se examinan los máximos adyacentes de aquellos mínimos que sean  $\leq \delta$ , considerando que la anomalía puede deberse a una burbuja sólo en aquellos casos en los que ambos máximos sean  $\leq \psi$ . Entonces el tamaño de la disminución vendrá dado por  $\Delta(\text{sTEC})$ :

$$\Delta(sTEC) = abs(sTEC_{min}) + abs\left(\frac{sTEC_{max1} + sTEC_{max2}}{2}\right) \quad (1)$$

Siendo abs el valor absoluto, y min, max1 y max2, el valor mínimo de la desviación, y los máximos adyacentes (max1 antes de encontrar la EPB, max2 cuando se ha recuperado el sTEC). Por último se inspecciona el intervalo temporal  $\Delta t$  entre los dos máximos:

$$\Delta t = UT_{max2} - UT_{max1} \quad (2)$$

que, siguiendo a otros autores (DasGupta et al., 1983, 2005; Basu y Basu, 1986), está comprendido entre 10 minutos y 3 horas. Es importante notar que este parámetro sobreestima la duración real de la anomalía porque la EPB puede comenzar después del primer máximo, y terminar antes que el segundo. Por ello, recibe el nombre de duración aparente y sirve como límite por exceso de la duración real de la perturbación.

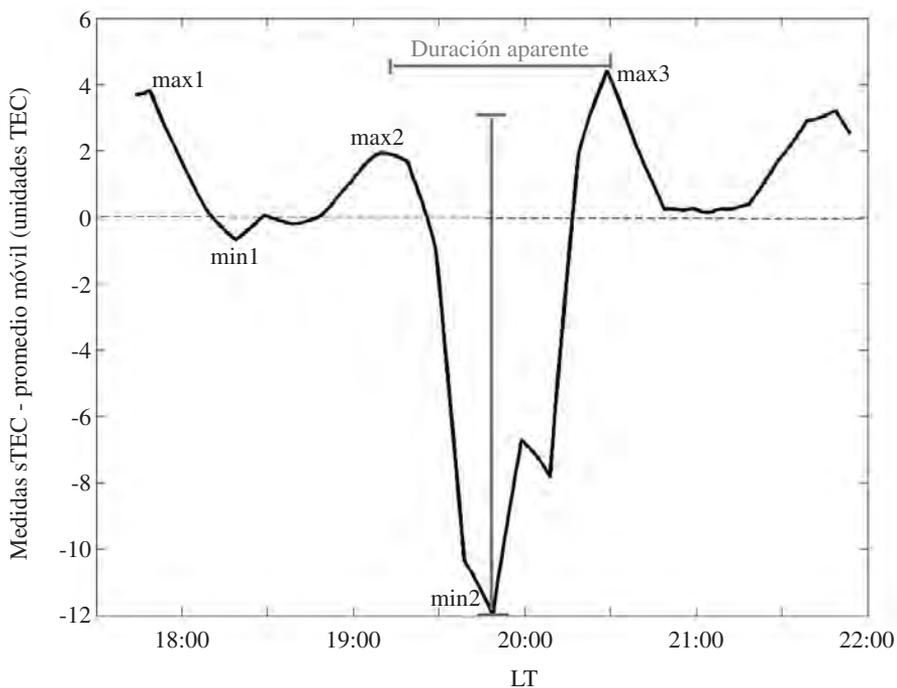
Si se cumplen todas las condiciones, entonces se considera que la anomalía es debida a la presencia de una burbuja, y estará caracterizada por los parámetros  $\Delta(sTEC)$  y  $\Delta t$ . También será posible localizarla temporal y espacialmente. El tiempo de ocurrencia se estima a partir del tiempo en el que se detecta el correspondiente mínimo local en sTEC, mientras que para la localización geográfica se considera que la burbuja está localizada en el pierce point o punto subionosférico (Portillo et al., 2008). Este punto es la intersección del rayo que une el satélite con la estación y la ionosfera, supuesta esférica, infinitesimal, centrada en la Tierra y a una altura de 400 km.

Por último, es importante notar que aunque se cumplan todas las condiciones, debe comprobarse visualmente caso por caso porque el algoritmo puede detectar burbujas erróneamente cuando el promedio móvil no representa correctamente la tendencia de la serie.

En el ejemplo de la Fig. 1, puede observarse que las condiciones sólo se cumplen en la región entre los máximos 2 y 3.

### 3. DATOS

En este trabajo se han procesado las medidas del sTEC procedente de estaciones del África ecuatorial, tanto de la red IGS, como de la europea EGNOS, durante el año 2004. A la primera pertenecen: ASC1 (Isla Ascensión, territorio perteneciente al Reino Unido), MALI (Malindi, Kenia), y NKLK (Libreville, Gabón). De la red EGNOS se han escogido: BRAZ (Brazzaville, Congo), DOUA (Douala, Camerún), LOME (Lome, Togo) y NDJA (N'Djamena, Chad). Las coordenadas de las estaciones, junto con sus declinaciones geomagnéticas se muestran en la Tabla 1. La Fig. 2 representa la localización espacial de las mismas.

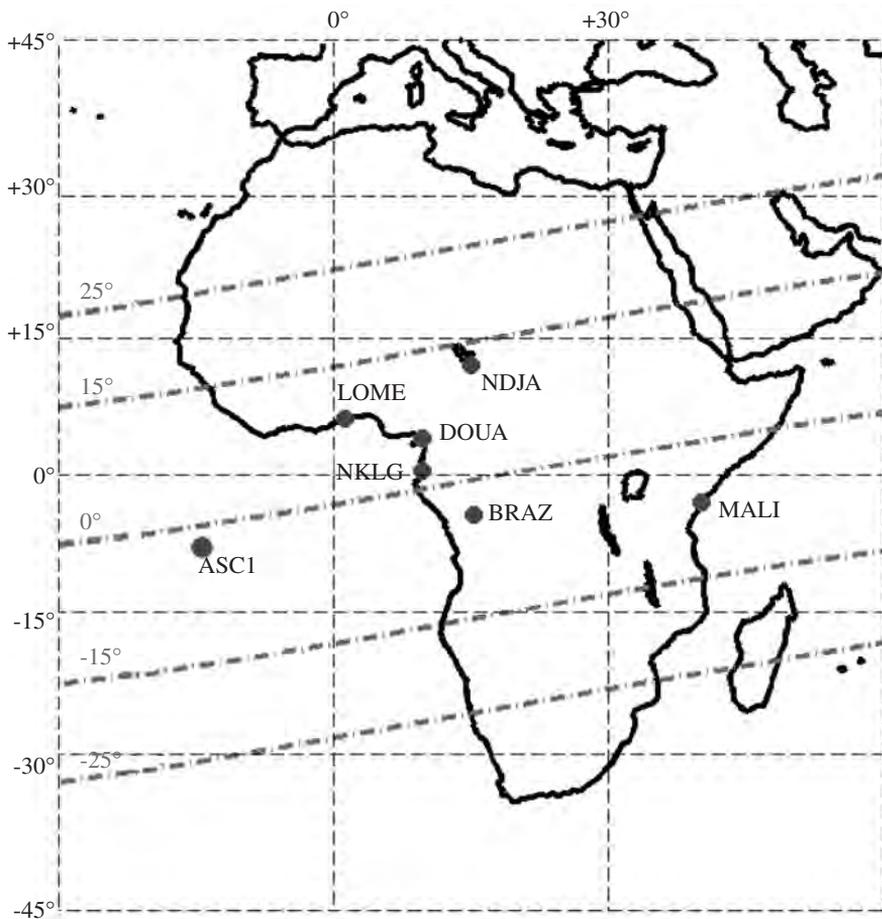


**Figura 1.-** Ejemplo de detección de una burbuja a partir de las diferencias entre las medidas de sTEC y el promedio móvil a 90 min.

**Tabla 1.-** Coordenadas geográficas y geomagnéticas, y declinación geomagnética de las estaciones utilizadas en este trabajo

	<b>Lat (grados)</b>	<b>Lon (grados)</b>	<b>GLat (grados)</b>	<b>GLon (grados)</b>	<b>DG (grados)</b>
ASC1	-8.0	-14.4	-2.40	56.60	-16.863
BRAZ	-4.3	15.3	-3.71	86.36	-3.382
DOUA	4.0	9.7	5.45	82.33	-2.718
LOME	6.2	1.3	9.08	74.41	-4.282
MALI	-3.0	40.2	-6.78	111.17	-1.031
NDJA	12.1	15.0	12.38	89.00	-0.23
NKLG	0.4	9.7	1.90	81.69	-3.656

El contenido electrónico oblicuo se ha determinado cada 10 minutos a partir del retraso de las señales L1 y L2 de receptores GPS de doble frecuencia y a



**Figura 2.-** Localización espacial de las estaciones.

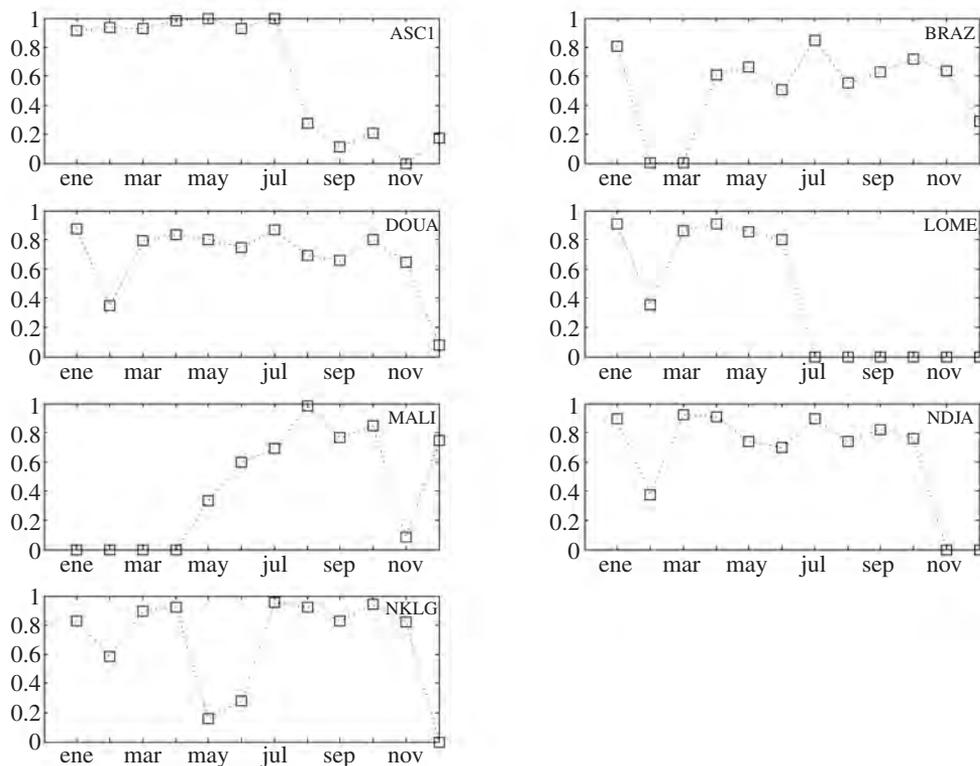
continuación se ha calibrado, corrigiendo los errores. La Tabla 2 muestra el número de arcos (pasos de cada satélite, vistos desde cada estación) disponibles por mes en cada estación. Esta información no es suficiente para cuantificar la calidad de los datos. Por ello se introduce un índice de observaciones que se construye de la siguiente manera: 1) se calcula para cada día y estación la siguiente cantidad:

$$\text{Minutos\_Acumulados} = \sum (UT_{\max} - UT_{\min}) \quad (3)$$

donde  $UT_{\max}$  y  $UT_{\min}$  son los instantes inicial y final de cada arco, expresados en minutos; 2) para cada estación se obtiene la suma de los minutos acumulados en cada mes; 3) se determina de entre todos los meses y estaciones el valor máximo; y 4) se dividen todos los valores obtenidos en 2) por el máximo en 3).

**Tabla 2.-** Número de arcos disponibles por mes desde cada estación.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	total
ASC1	624	530	514	516	541	558	597	180	88	148	0	0	<b>4296</b>
BRAZ	543	12	16	410	511	382	592	502	597	558	581	265	<b>4969</b>
DOUA	572	234	497	546	527	496	541	431	610	604	594	74	<b>5726</b>
LOME	0	220	479	536	493	512	144	0	0	0	0	0	<b>2384</b>
MALI	625	589	532	566	234	341	430	599	561	631	63	592	<b>5763</b>
NDJA	582	230	460	540	507	508	594	467	631	603	554	620	<b>6296</b>
NKLG	542	379	507	536	97	163	562	598	628	631	629	619	<b>5891</b>
<b>Total</b>	<b>3488</b>	<b>2194</b>	<b>3005</b>	<b>3650</b>	<b>2910</b>	<b>2985</b>	<b>3460</b>	<b>2777</b>	<b>3115</b>	<b>3175</b>	<b>2421</b>	<b>2170</b>	<b>35325</b>



**Figura 3.-** Valor del índice de observaciones en cada estación.

De esta forma se obtiene un índice mensual cuyo valor oscila entre 0 y 1 y que informa sobre la calidad de los datos en relación al tiempo que cada satélite es

visto desde la estación en un mes, con respecto al valor máximo mensual obtenido en el paso 3. Este valor máximo (650150 minutos) se obtuvo en mayo en la estación de ASC1. En la Fig. 3 se muestran los valores del índice de observaciones en las estaciones consideradas. De dicha grafica puede desprenderse el resultado de que los datos no son igual de válidos en todos los meses, lo que será de especial relevancia a la hora de analizar la validez de posteriores resultados.

El intervalo analizado corresponde a un periodo de moderada a baja actividad solar, con un flujo solar  $F_{10.7}$  de unas 100 unidades, aproximadamente.

#### 4. RESULTADOS

Como puede comprobarse de la Fig. 4, donde se muestra el número de burbujas registradas por mes y estación, desde algunas estaciones la detección de EPBs ocurre con más frecuencia. En general, el número de burbujas es mayor en los meses de marzo-abril y septiembre-octubre, siempre que haya suficientes datos disponibles (Fig. 3). En total se han detectado 394 burbujas.

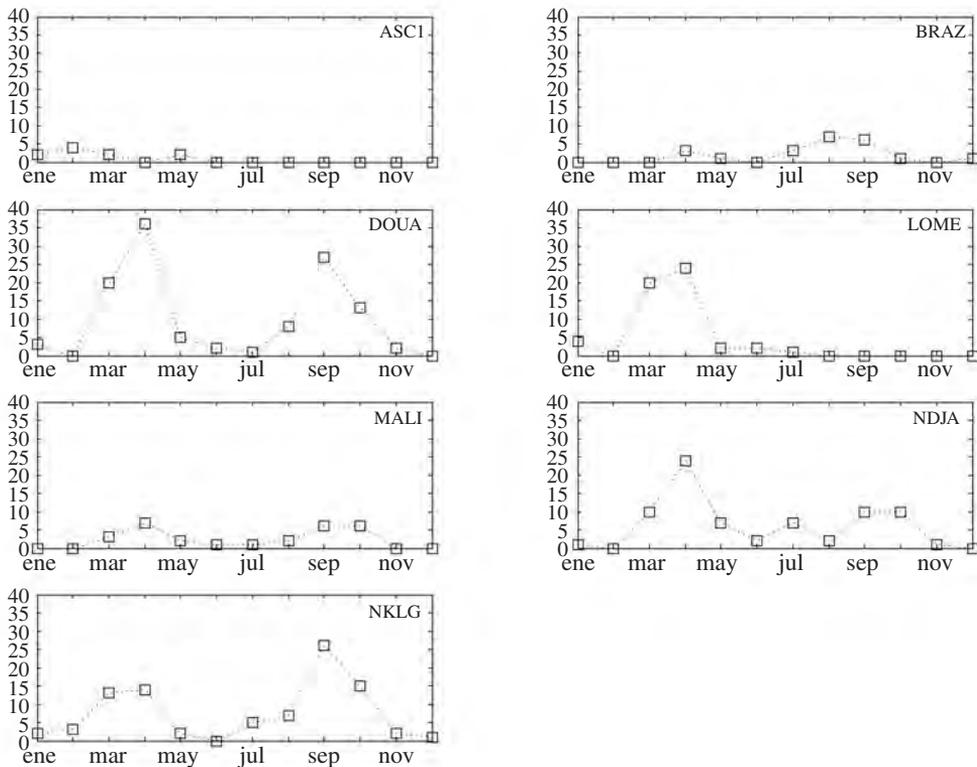
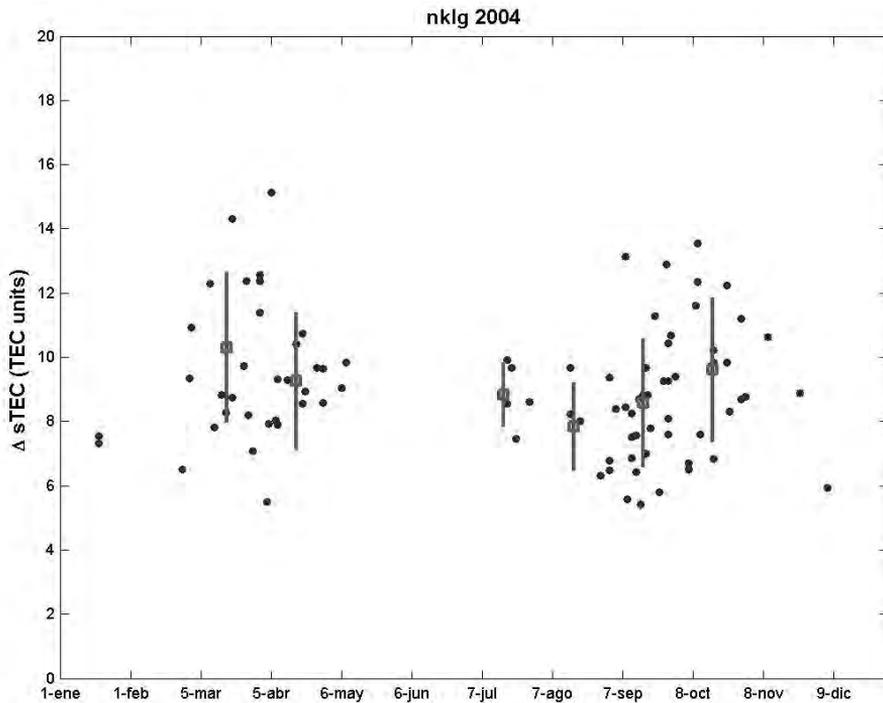


Figura 4.- Número de burbujas detectadas por mes en cada estación.

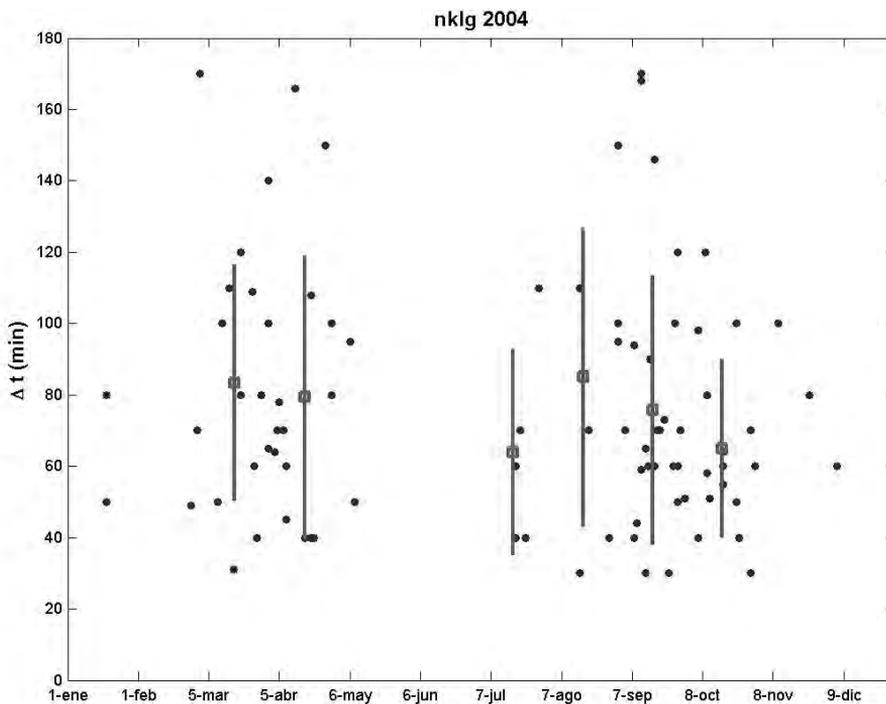
**Tabla 3.-** Número de burbujas detectadas por mes en cada estación.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	total
ASCI	2	4	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	10
BRAZ	0	0	0	3	1	0	3	7	6	1	0	1	22
DOUA	3	0	20	36	5	2	1	8	27	13	2	0	117
LOME	4	0	20	24	2	2	1	0	0	0	0	0	53
MALI	0	0	3	7	2	1	1	2	6	6	0	0	28
NDJA	1	0	10	24	7	2	7	2	10	10	1	0	74
NKLG	2	3	13	14	2	0	5	7	26	15	2	1	90
<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>68</b>	<b>108</b>	<b>21</b>	<b>7</b>	<b>18</b>	<b>26</b>	<b>75</b>	<b>45</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>394</b>

Para comprender el patrón de ocurrencia de EPBs en la región de estudio, se ha escogido la estación NKLG como modelo. La evolución a lo largo del año 2004 del tamaño y de la duración aparente de las burbujas detectadas en esta



**Figura 5.-** Evolución mensual del tamaño de EPBs en NKLG. Se indica el valor medio y la desviación estándar en los meses con más de 5 datos.

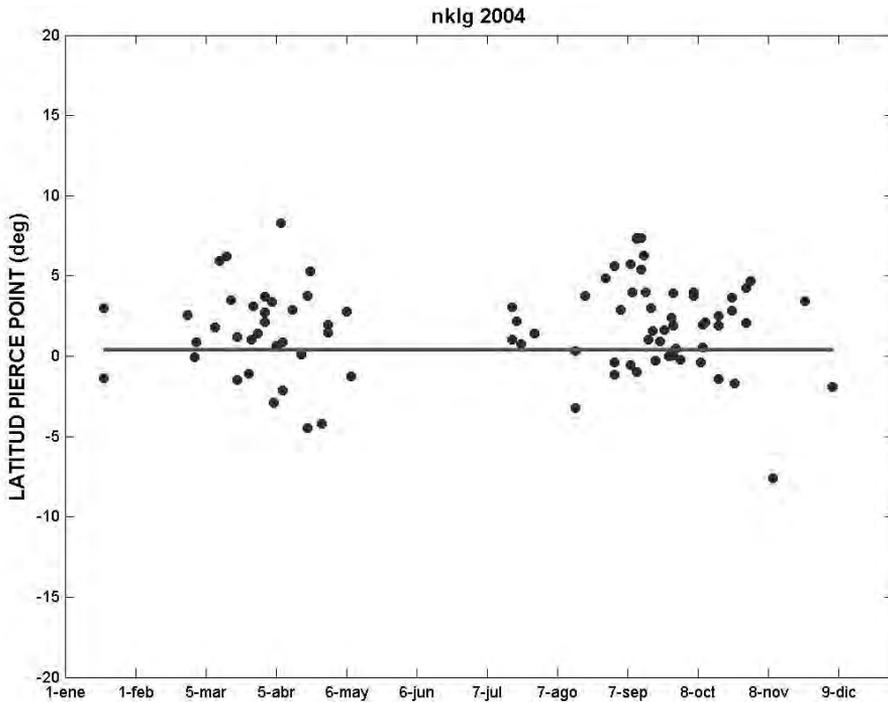


**Figura 6.-** Evolución mensual de la duración aparente de las EPBs registradas en NKLG. Se indica el valor medio y la desviación estándar en los meses con más de 5 datos.

estación se ha representado en las Figuras 5 y 6, respectivamente. En ambas se ha incluido las medias y desviaciones estándar mensuales en aquellos meses con más de 5 datos. Puede observarse que el tamaño muestra un marcado comportamiento estacional, con máximos en los meses equinocciales. La duración aparente, por el contrario, presenta un amplio espectro de valores, desde los 40 a los 160 minutos, siendo 75 minutos una media representativa, aunque con gran desviación.

El tiempo de ocurrencia de las burbujas (medido en tiempo local, LT, de la estación) suele ser entre las 19:00 y las 24:00, aunque a veces pueden detectarse antes de las 04:00.

Las Figs. 7 y 8 representan, respectivamente, la latitud y longitud geográficas del punto ionosférico asociado a cada EPB detectada, junto con la correspondiente coordenada de la estación, que aparece dibujada en cada figura con una línea horizontal. Resulta llamativo el diferente comportamiento en latitud y longitud de dichos puntos puesto que pueden aparecer indistintamente tanto al N como al S de la estación (Fig. 7), mientras que parece más probable encontrarlas al W de la misma, y no hacia el E. Sorprendentemente, esta restricción en longitud de las EPBs aparece en el resto de estaciones analizadas, mientras que la latitud depende de la posición de cada estación.



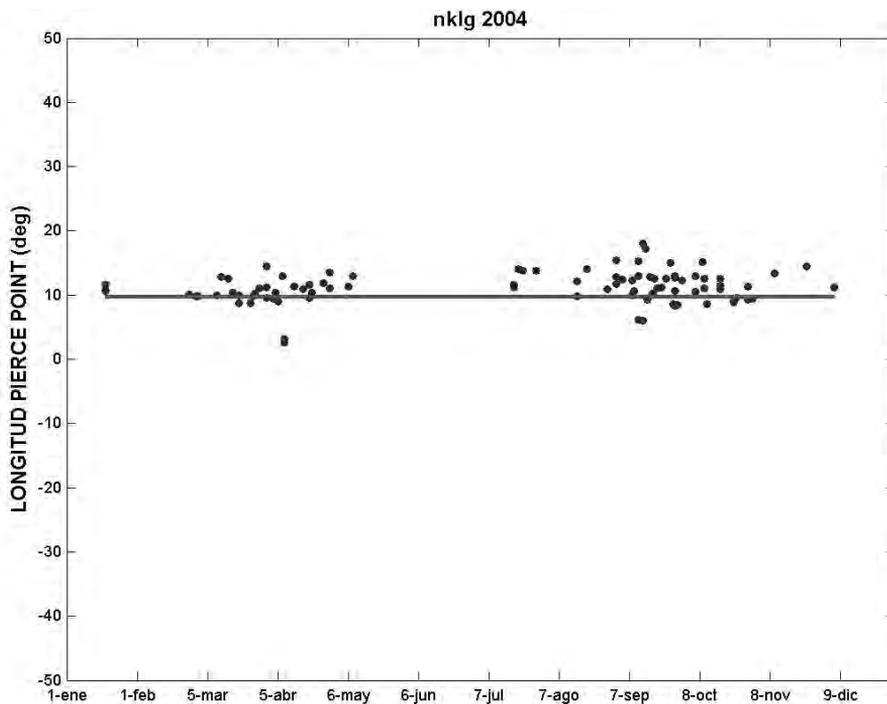
**Figura 7.-** Latitud de los puntos subionosféricos asociados a las EPBs detectadas en NKLK. La línea horizontal señala la latitud de la estación.

## 5. CONCLUSIONES

A grandes rasgos, el método descrito parece detectar burbujas de forma correcta. Su ejecución sobre los registros de sTEC en estaciones del África ecuatorial durante el año 2004 ha permitido detectar 394 burbujas y caracterizarlas a partir de los parámetros definidos en el algoritmo: tamaño y duración aparente. También ha sido posible posicionarlas geográficamente de una forma aproximada en el punto subionosférico y estimar el tiempo de su ocurrencia en tiempo local de la estación.

El promedio de la disminución en sTEC es de 9 unidades TEC, y de la duración aparente de 75 minutos. El método es capaz de detectar burbujas que produzcan una disminución en sTEC de al menos 5 unidades TEC, lo que es equivalente a un error de 0.5 m en un arco de satélite (Manucci et al., 1998).

Tanto el incremento en el número de EPBs registradas como el aumento de su tamaño en los meses equinociales puede explicarse teniendo en cuenta la teoría propuesta por Tsunoda (1985), según la cual esta mayor detección sucede porque la probabilidad de aparición de burbujas es tanto mayor cuanto más alineados se encuentren el terminador solar y los tubos de flujo magnético. En el caso de que la declinación de las estaciones sea próxima a cero, como sucede en las estaciones de



**Figura 8.-** Longitud de los puntos subionosféricos correspondientes a las burbujas registradas desde NKLG. La línea horizontal señala la longitud de la estación.

este trabajo, excepto en ASC1 (Tabla 1), este alineamiento sucede en las proximidades de los equinoccios.

Las estaciones con mayor probabilidad de detección de EPBs son DOUA, LOME, NDJA y NKLG, que son las de menor declinación (Tabla 1). Aunque la declinación en MALI también es pequeña, la discrepancia de resultados puede explicarse por la baja calidad de los datos de partida en MALI, como puede desprenderse de los correspondientes valores del índice de observación (Fig. 3).

Asumiendo que la densidad de plasma permanece constante a lo largo del tubo de flujo disminuido (Hanson & Bamgboye, 1984), la disminución en sTEC respecto del entorno será mayor en las proximidades de la cresta ecuatorial (AE, anomalía ecuatorial) que en el ecuador geomagnético. Esto significa que fijada una estación, y siempre que la configuración geométrica estación-AE-satélite lo permita, la detección de EPBs será más fácil en las proximidades de la AE puesto que el contraste entre densidades será mayor, y por tanto también lo será el tamaño de la burbuja tal y como aquí se ha definido. Esta es la razón por la que en la Fig. 7 hay prácticamente el mismo número de burbujas (puntos subionosféricos) al Norte y al Sur que la estación, ya que al encontrarse NKLG próxima al ecuador geomagnético (Tabla 1), el efecto de la Anomalía Ecuatorial Norte y Sur es equivalente. Sin embargo, en estaciones próximas a una de las crestas se detectarán más burbujas en la cercanía

de ésta pues su influencia será más notable. Este es el caso de LOME que se encuentra prácticamente situada bajo la cresta Norte de la AE (Tabla 1), y por ello el número de EPBs localizadas al Norte de esta estación es significativamente mayor al encontrado en el Sur.

Algunos aspectos del método pueden mejorarse. Por ejemplo, la duración aparente, que representa un límite superior de la duración real, puede redefinirse para que, por un lado, adquiriera un significado físico y, por otro, relacionarla con el tamaño de las EPBs. Valladares et al. (2004) advirtieron que la duración temporal del paso de una disminución es función de la anchura de la burbuja y de la elevación del satélite. Conforme la elevación de la línea de visión se reduce, la disminución en TEC se vuelve mucho más ancha. Esto significa que, si se descartaran elevaciones bajas, se deberían obtener duraciones menores.

Otra mejora interesante podría ser prolongar el promedio móvil hasta el comienzo y final de la serie de medidas para evitar la pérdida de información en dichos intervalos. Esto puede significar un aumento de la sensibilidad para detectar valores anómalos en las series. Con este mismo propósito los valores elegidos de  $\delta$ ,  $\psi$  y  $\Delta t$  podrían reducirse para incrementar la capacidad de la técnica propuesta para detectar disminuciones de menor tamaño.

Finalmente, consideramos que la disponibilidad de un mayor número de estaciones, y el uso de más links satélite-estación permitiría detectar la misma burbuja desde diferentes ángulos, lo que sería de gran relevancia para caracterizarla geométricamente. También es importante notar que la comparación de sTEC entre diferentes estaciones informa sobre la localización de la región ionosférica afectada por la disminución de densidad electromagnética.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Luigi Ciruolo del Istituto di Fisica Applicata “Nello Carrara” de Florencia, Italia, su valiosa labor en el procesamiento de ficheros RINEX y en la calibración de registros de sTEC, sin los que esta investigación no habría sido posible. El trabajo forma parte de las investigaciones del “Grupo de Estudios Ionosféricos y Técnicas de Posicionamiento Global por Satélite” GNSS” (Grupo: 910596) subvencionado por la Universidad Complutense y la Comunidad de Madrid, y se ha llevado a cabo en el marco del Proyecto “Influencia de la anomalía ecuatorial en la ionosfera y su repercusión en las comunicaciones satelitales” subvencionado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo.

## 7. REFERENCIAS

AARONS, J., M. MENDILLO & R. YANTOSECA (1996). GPS phase fluctuations in the equatorial region during the MISETA 1994 campaign. *Journal of Geophysical Research* 101(A12), 26851-26862.

- CATON, R. G., W. J. MCNEIL, K. M. GROVES, & S. BASU (2004). GPS proxy model for real-time UHF satellite communications scintillation maps from the Scintillation Network Decision Aid (SCINDA). *Radio Science*, 39(1) RS1S22 doi: 10.1029/2002RS002821.
- DANDEKAR, B. S. & K. M. GROVES (2004). Using ionospheric scintillation observations for studying the morphology of equatorial ionospheric bubbles. *Radio Science* 39(3), RS3010 doi: 10.1029/2003RS003020.
- GWAL, A. K., R. WAHI & S. DUBEY (2005). Simultaneous observation of scintillation and TEC using GPS receiver at low latitude station Bhopal. *Ionospheric Effects Symposium*. Alexandria, Virginia, USA, pp. 607-617.
- HANSON, W. B. & D. K. BAMGBOYE (1984). The measured motions inside equatorial plasma bubbles. *Journal of Geophysical Research*, 89(A10), 8997-9008.
- HUANG, C. Y., W. J. BURKE, J. S. MACHUZAK, L. C. GENTILE & P. J. SULTAN (2001). DMSP observations of equatorial plasma bubbles in the topside ionosphere near solar maximum. *Journal of Geophysical Research* 106(A5), 8131-8142.
- KINTNER, P. M., & B. M. LEDVINA (2005). The ionosphere, radio navigation, and global navigation satellite systems. *Advances in Space Research*, 35, 788-811.
- MANNUCCI, A. J., B. D. WILSON, D. N. YUAN, C. H. HO, U. J. LINDQWISTER & T. F. RUNGE (1998). A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements. *Radio Science* 33(3), 565-582.
- McClure, J. P., W. B. Hanson & J. H. Hoffman, (1977). Plasma bubbles and irregularities in the equatorial ionosphere. *Journal of Geophysical Research* 82 (19), 2650-2656.
- MENDILLO, M. & J. BAUMGARDNER (1982). Airglow characteristics of equatorial plasma depletions. *Journal of Geophysical Research* 87(A9), 7641-7652.
- PI, X., J. MANNUCCI, U. J. LINDQWISTER & C. M. HO (1997). Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network. *Geophysical Research Letters*, 24, 2283-2286.
- PIMENTA, A. A., P. R. FAGUNDES, Y. SAHAI, J. A. BITTENCOURT & J. R. ABALDE (2003). Equatorial F-region plasma depletion drifts: latitudinal and seasonal variations. *Annales Geophysicae*, 21, 2315-2322.
- PORTILLO, A. (2005). Desarrollo de una metodología para la detección de burbujas ionosféricas utilizando registros de contenido electrónico total oblicuo, Trabajo de Investigación Tercer Ciclo, Universidad Complutense, Madrid, 219 pp.
- PORTILLO, A., M. HERRAIZ, S. M. RADICELLA & L. CIRAULO (2008). Equatorial plasma bubbles studied using African slant total electron content observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, doi:10.1016/j.jastp.2007.05.019.
- TSUNODA, R. T. (1985). Control of the Seasonal and Longitudinal Occurrence of Equatorial Scintillations by the longitudinal gradient in integrated E region Pedersen Conductivity. *Journal of Geophysical Research*, 90 (A1), 447-456.

- VALLADARES, C. E., J. VILLALOBOS, R. SHEEHAN & M. P HAGAN (2004). Latitudinal extensión of low- latitude scintillations measured with a network of GPS receivers. *Annales Geophysicae*, 22, 3155-3175.
- WHALEN, J. A. (1997). Equatorial bubbles observed at the north and south anomaly crest: Dependence on season, local time and dip latitude. *Radio Science*, 32(4), 1559-1566.
- WOODMAN, R. F. & C. LA HOZ (1976). Radar observations of F region equatorial irregularities. *Journal of Geophysical Research*, 81 (31), 5447-5466.