

IMÁGENES ÓPTICAS DE LAS DISMINUCIONES DE PLASMA EN LA CRESTA DE LA ANOMALÍA ECUATORIAL

H.S.S. Sinha¹, P. K. Rajesh¹, R. N. Misra¹, R. Pandey², N. Dutt¹, M. B. Dadhania¹ y S. B. Banerjee¹

¹*Physical Research Laboratory
Navrangpura, Ahmedabad 380 009, India*

²*M L S University, Udaipur, India*

RESUMEN

Se realizó un experimento con imágenes ópticas de todo el cielo, tomadas desde el Monte Abu ($24.55^{\circ}N$, $72.71^{\circ}E$, $18.48^{\circ}N$ Geomag.) para estudiar las disminuciones de gran escala del plasma ionosférico que ocurren en la cresta de la región de anomalía del hemisferio norte. Durante la campaña experimental, se encontraron disminuciones de plasma en imágenes de luminiscencia nocturna a $630nm$. En una de las noches de estudio se observó que las disminuciones de plasma sufrían primero una división en dos partes que se movían con velocidades diferentes. Luego de 15 minutos, una de las partes se unió a otra zona de disminución de plasma. Esta es una observación nueva y es un indicador de un gran cambio vertical en la velocidad zonal. Se observó que el extremo norte de las disminuciones de plasma se bifurcaba. Estas observaciones nos han permitido obtener imágenes del extremo norte de la disminuciones de plasma. Ese extremo corresponde a una latitud geomagnética cercana a $23.1^{\circ}N$, la cual, al ser mapeada en términos de la altura máxima alcanzada por las disminuciones en el ecuador geomagnético, corresponde a $950km$. La burbuja vertical incrementa su velocidad de levantamiento durante las noches de observación, estuvo entre 53 y $57ms^{-1}$.

ABSTRACT

An all sky optical imaging experiment was conducted from Mt. Abu ($24.55^{\circ}N$, $72.71^{\circ}E$, $18.48^{\circ}N$ Geomag.) to study the large-scale ionospheric plasma depletions from the crest of the anomaly region in the Northern Hemisphere. During this campaign, plasma depletions were observed in $630nm$ nightglow images. On one of the nights it was observed that plasma depletions first split in to two parts, which moved with different velocities. After about 15 min, one of the depleted parts joined with another depletion. This is a new observation and indicates strong vertical shear in the zonal velocity. The Northern end of some of the plasma depletions was observed to be bifurcated in two parts. These observations enabled us to image the northern fringe of the plasma depletions. The northern end of the observed plasma depletions corresponds to geomagnetic latitude of about $23.1^{\circ}N$, which when mapped back in terms of the maximum altitude attained by depletions at the geomagnetic equator, corresponds to about $950km$. The vertical bubble rise velocity for both nights, when plasma depletions were observed, was in the range of 53 to $57ms^{-1}$.

1. INTRODUCCIÓN

Aún es fascinante el estudio de las irregularidades atmosféricas asociadas con la expansión de la capa F ecuatorial (*equatorial spread F*: ESF) a pesar que ya se ha realizado una gran cantidad de trabajos utilizando una enorme variedad de métodos y que también se tiene una buena comprensión del comportamiento de la ionósfera ecuatorial nocturna, que es cuando esas irregularidades suelen generarse. Los resultados nuevos que se reportaron durante los últimos años han establecido que la técnica es una herramienta muy importante para el diagnóstico de tales irregularidades ionosféricas. Entre las observaciones más importantes

que utilizan los métodos de imágenes ópticas de todo el cielo están las referidas a las ondas de brillo (BW) o los patrones de brillo (BP) en esas imágenes. (Colerico et al., 1996, Mendillo et al., 1997a & 1997b, Sinha y Raizada, 2000). Las BP sólo fueron observadas en las imágenes tomadas con $630nm$ y con $557.7nm$, pero están ausentes de las imágenes tomadas a $777.4nm$ que fueron tomas casi simultáneamente. Se supone que estos incrementos del brillo nocturno, o los patrones de brillo son una señal característica del máximo de temperatura de medianoche (MTM). (Colerico et al., 1996, Mendillo et al., 1997a & 1997b, Sinha y Raizada, 2000). La práctica ausencia de los patrones de brillo en las

imágenes a $777.4nm$ es uno de las evidencias a favor de tal hipótesis. Sin embargo, Sinha et al. (2001) han reportado la aparición de esos patrones de brillo también en las imágenes a $777.4nm$. Entonces, se requieren de más observaciones y análisis para comprender el mecanismo generador de estas BP. Otro resultado muy interesante que se ha notado recientemente, es la aparición de estructuras de burbujas de plasma alineadas con un campo. Estas estructuras están en las imágenes a $777.4nm$ pero no en las imágenes simultáneas tomadas a $630nm$ (Abalde et al., 2001). Estos dos resultados recientes demuestran que el actual conocimiento de la generación de la disminución de plasmas no está completo, por lo que aquí se hace énfasis en la importancia de los estudios detallados de las irregularidades de plasma en la línea de emisión de $777.4nm$.

Si bien la naturaleza y evolución de las disminuciones de plasma han sido previamente estudiadas para estaciones no ecuatoriales (Mendillo y Baumgardner, 1982; Sahai et al., 1994; Sales et al., 1996; Weber et al., 1996; Fagundes et al., 1997), sólo se conocen datos para el hemisferio sur; y pese a que existen algunos estudios previos sobre el hemisferio norte (Sinha et al., 1996; 2000; 2001), todos ellos fueron realizados muy cerca del ecuador magnético. El presente trabajo se centra en el estudio de imágenes tomadas desde el Monte Abu ($24.55^{\circ}N$, $72.71^{\circ}E$, $18.48^{\circ}N$ Geomag.), muy cerca de la cresta de anomalía ecuatorial del hemisferio norte; e intentó fotografiar el margen norte de las disminuciones de plasma. Estas fueron observadas durante dos noches, y aquí se reportan los datos interesantes que se encontraron en esos casos.

2. DETALLES DEL EXPERIMENTO

En la figura 1 se muestra el diagrama de bloques del sistema de imágenes desarrollado por el Physical Research Laboratory (PRL, Ahmedabad, India) y utilizado en el Mt. Abu. El sistema está descrito en detalle en publicaciones previas (Sinha et al., 1996, 2001). Durante la presente campaña, se tomaron imágenes del brillo nocturno a $630nm$ utilizando un filtro de interferencia cuyo ancho de banda es de $1nm$, y una cámara de $35mm$. Las imágenes tomadas con la cámara se revelaron y fueron digitalizadas con una unidad de $12 - bits$. Luego se las procesó para eliminar los ruidos de fondo: el natural y el propio del sistema.

3. OBSERVACIONES REALIZADAS

Las imágenes fueron tomadas desde el Mt. Abu durante el alba u ocaso, dependiendo de las condiciones meteorológicas y la posición de la Luna. Cada observación consistió en la exposición por $30s$ con 15 minutos entre dos tomas consecutivas. Pese a que el sistema de imágenes de todo el cielo tiene un campo de visión de 180° , sólo se reportan aquí los datos correspondientes a un campo de visión (FOV) de $\pm 75^{\circ}$ de ángulo cenital. Esto evita los errores debidos a la distorsión del borde del campo de visión. La campaña duró siete noches

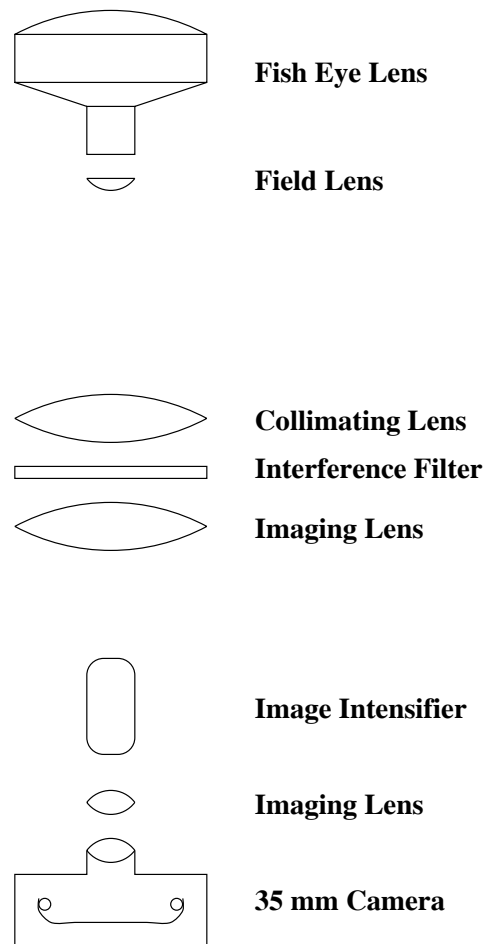


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de imágenes de todo el cielo desarrollado en el PRL-Ahmedabad.

consecutivas, de las cuales sólo dos presentaron una disminución de plasma, los días 14 y 15 de abril de 1999. El período de observación, del 12 al 18 de abril está clasificado como geomagnéticamente quieto. Debido a que no existía ninguna ionosonda operando cerca del ecuador geomagnético durante ese tiempo, se carece de la información acerca de las condiciones ionosféricas durante el período de inicio de la expansión ecuatorial F. Se contó con los ionogramas de la estación más cercana (Ahmedabad, $23^{\circ}N$, $72.4^{\circ}E$, $16.8^{\circ}N$ Geomag.), que muestran la presencia de una expansión F en las dos noches que se observaron las disminuciones de plasma.

La figura 2 muestra los ionogramas tomados desde Ahmedabad el 14 de abril de 1999, a horas 19:00, 20:00, 21:00, 22:00, 23:00 y 00:00 (LT). No se observa ninguna señal de la expansión F en los ionogramas de las 19:00 LT, pero sí se encuentra una señal fuerte a las 20:00 LT. Eso demuestra que las irregularidades llegaron a Ahmedabad después de las 19:00 LT. Igualmente, la señal de la expansión F aún es fuerte a las 23:00, pero desapareciendo después. El 15 de abril, se observó una expansión F en los ionogramas de las 21:00 y las 2:00 LT, debilitándose después y no se halla presente en los posteriores.

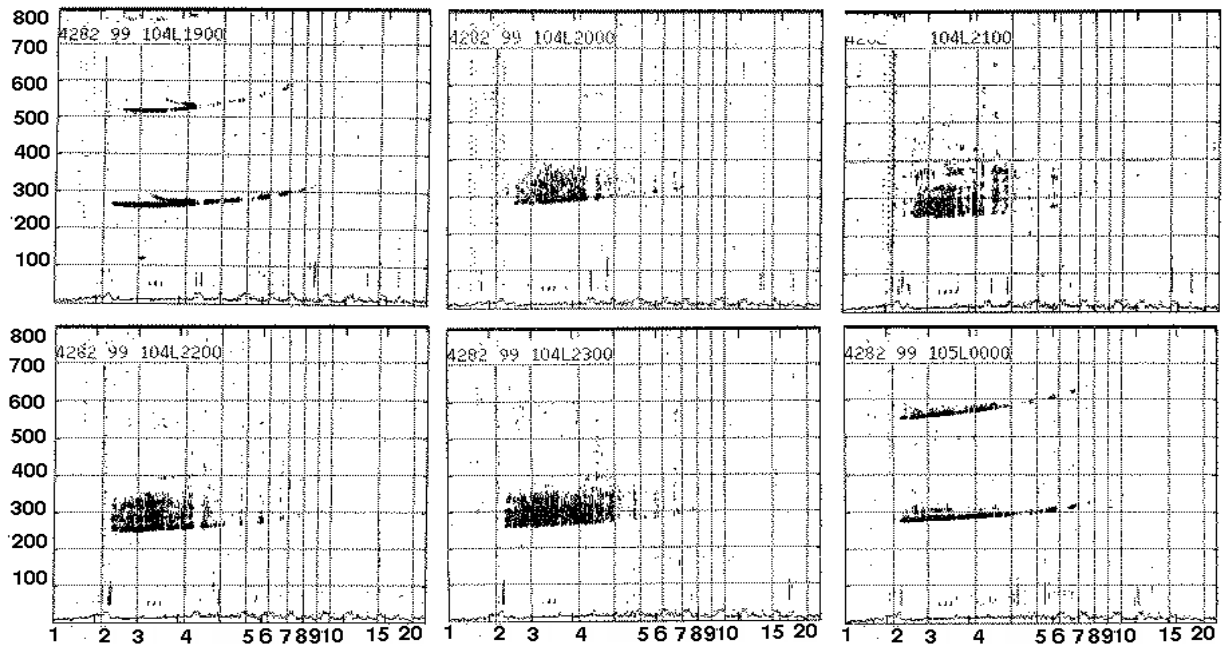


Figura 2. Ionogramas desde Ahmedabad ($23^{\circ}N$, $72.4^{\circ}E$, $16.8^{\circ}N$ Geomag.) tomados respectivamente a las 19:00, 20:00, 21:00, 22:00, 23:00 y 00:00 LT del 14 de abril de 1999.

4. RESULTADOS

La figura 3 muestra una serie de imágenes a $630.0nm$ tomadas el 14 de abril de 1999. Las regiones oscuras (claras) de la imagen corresponden intensidades bajas (altas) del brillo nocturno. Por tanto, se interpretan como zonas de baja (alta) densidad de electrones en la capa de emisión. Esa noche, las observaciones pudieron realizarse sólo desde las 20:50 LT y la primera imagen ya muestra la señal de una disminución de plasma. Se observan claramente dos bandas de disminución en la porción suroccidental de la imagen. La porción norte de la disminución de plasma, que se encuentra hacia el este de la imagen, presenta una bifurcación; la cual se nota claramente en la siguiente imagen (tomada a las 21:15 LT), cuando la disminución se ha desplazado hacia el este. También se ve que la segunda banda, que estaba cerca del borde oeste de la primera imagen, se desplazó hacia el centro. Esta disminución creció más hacia el norte y presentó una apariencia más ondulada, con el extremo sur con una tendencia a desviarse hacia el oeste. La misma imagen muestra también la aparición de una nueva disminución en el extremo occidental del campo de visión. En la siguiente imagen, tomada a las 21:30 LT, se ha desplazado desde el centro, y tomado un aspecto sinusoidal, manteniendo su extremo sur hacia el oeste. A las 21:55 LT la depresión se ha debilitado y llegó al extremo este del campo de visión. Esta disminución de plasma que estaba cerca del centro, se desplazó hacia el este y su extremo norte se bifurcó, a tiempo que otra

disminución de plasma entra al campo de visión desde el lado oeste.

A las 22:10 LT, la disminución de plasma que estaba sobre el borde oriental del campo de visión ha prácticamente desaparecido, y la disminución del este se desplazó aún más hacia el este. Para este tiempo, tiene la forma normal de las disminuciones de plasma. También se nota la aparición de otras dos disminuciones hacia el oeste del campo de visión, las cuales se desplazan hacia el este. Para las 22:55 LT, la imagen muestra que la disminución oriental se desplazó aún más hacia el este, mientras que la disminución del centro muestra una forma más ondulada, con sus extremos norte y sur notoriamente desviados hacia el este. De manera muy interesante, la disminución de plasma de las 22:55 LT, se ha dividido en dos. La porción sur flota hacia el este como una entidad propia, mientras que la porción norte se adhiere a una tercera disminución, que recién aparece. Esta es la primera vez que se observa la división y adhesión de disminuciones de plasma. En las imágenes posteriores se ve que las disminuciones de plasma se desplazan hacia el este, y para las 00:20 LT sólo una pequeña fracción queda dentro del campo de visión, demostrando así que la actividad del plasma sobre el Mt. Abu continuaba por lo menos hasta esa hora. Los ionogramas desde Ahmedabad no muestran ningún desplazamiento F después de las 23:00 LT, lo que demuestra que las irregularidades cruzaron por la latitud de la ciudad entre las 23:00 y la medianoche local.

El 15 de abril, las observaciones comenzaron a las

Mt. Abu
14 April 1999



630 nm
30 sec exp.

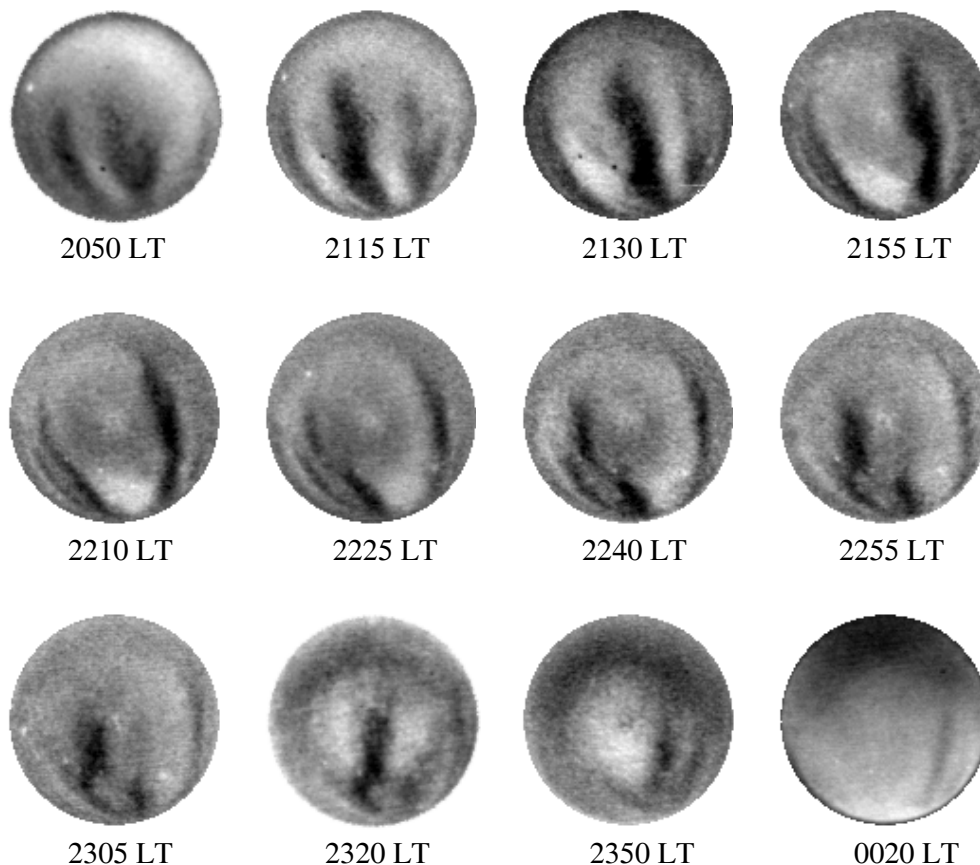


Figura 3. Imágenes de todo el cielo mostrando las disminuciones de plasma vistas desde el Mt. Abu ($24.55^{\circ}N$, $72.71^{\circ}E$, $18.48^{\circ}N$ Geomag.) el 14 de abril de 1999 en la banda de $630nm$. La flecha indica el norte magnético.

20:00 LT. La serie de imágenes de todo el cielo tomadas ese día se muestran en la figura 4, donde se ve la presencia de la disminución de plasma. Esta comienza débilmente en la porción sur del campo de visión a las 20:30 LT; pero a las 21:00 LT se aprecia una cantidad de disminuciones de plasma. Para las 20:30 LT, una disminución de plasma ha ingresado a la porción norte del campo de visión, y se bifurcó para las 21:00 LT. Al contrario de las disminuciones del día anterior, éstas son débiles y sólo se observan en la parte sur de la imagen; y no crecen mucho hacia el norte. Este día se tuvo disminuciones presentes hasta las 23:10 LT, desapareciendo completamente después.

Las observaciones presentadas aquí nos dan la oportunidad de estudiar el límite norte de su desplazamiento respecto de las regiones ecuatoriales, que es donde se producen. Se levantó un mapa del límite norte de las disminuciones de plasma asignándoles una altura correspondiente a las disminuciones sobre el ecuador con el Modelo Internacional Geomagnético de Campo de Referencia

(I.G.R.F.). La disminución de plasma que se muestra en la figura 4, para las 22:10 LT, es la que, aparentemente, ha alcanzado la mayor latitud geomagnética. Nuestros cálculos dan como resultado que la disminución de plasma del 14 de abril de 1999 alcanzó los $23.1^{\circ}N$ de latitud geomagnética. Cuando se mapea ésta disminución en términos de la máxima altura alcanzable en el ecuador, obtenemos una altura de $950km$. Los cálculos similares realizados para la disminución de plasma del 15 de abril de 1999, que fue mucho más débil que la anterior y limitada sólo a la porción sur de las imágenes. La latitud máxima alcanzada por la disminución de plasma de esa noche fue de $17.9^{\circ}N$, lo que corresponde a una altura de $590km$ sobre el ecuador.

También podemos seguir el movimiento hacia el norte de las disminuciones de plasma en las imágenes, hasta que deja el campo de visión. Esos datos fueron utilizados para calcular la velocidad de ascenso de las burbujas de plasma en el ecuador. En la noche del 14 de abril de 1999, la velocidad promedio de ascenso de las burbujas

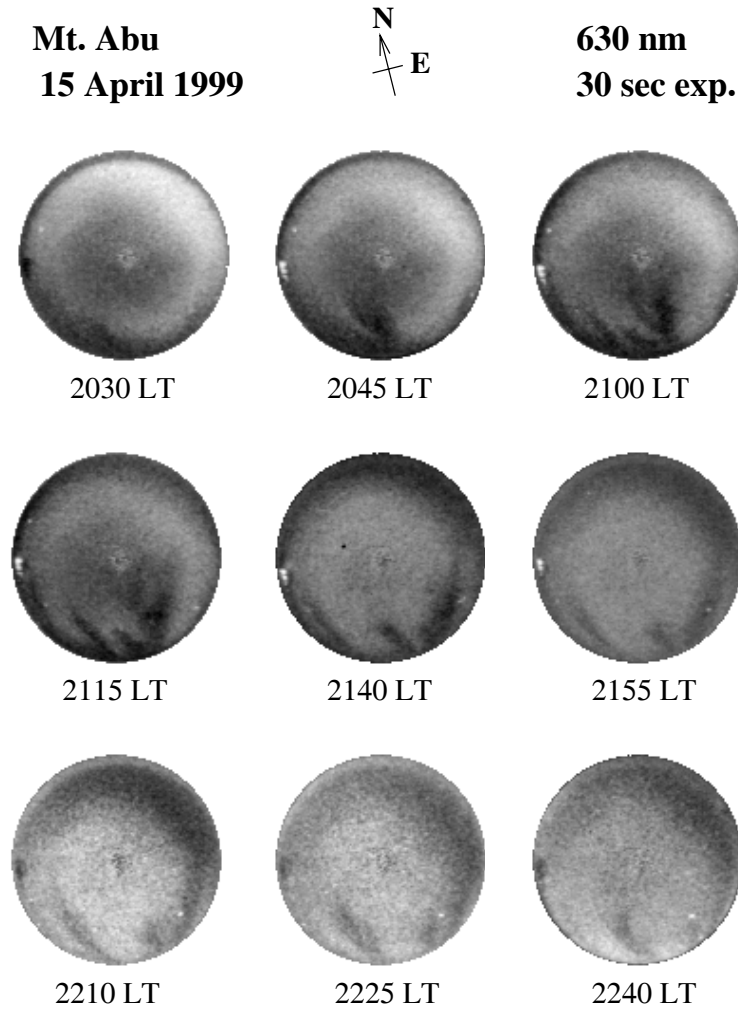


Figura 4. Imágenes de todo el cielo mostrando disminuciones de plasma vistas desde el Mt. Abu ($24.55^{\circ}N$, $72.71^{\circ}E$, $18.48^{\circ}N$ Geomag.) el 15 de abril de 1999 en la banda de $630nm$. La flecha indica el norte magnético.

de plasma fue de $57ms^{-1}$ entre las 20:50 y las 22:55 LT. A la noche siguiente, entre las 20:45 y las 21:15 LT, la velocidad de ascenso fue de $53ms^{-1}$.

También se determinó el punto en el cual se produjeron tanto la bifurcación de la disminución, como la adhesión de las porciones. Para el 14 de abril, corresponde a una altura sobre el ecuador de $400km$.

5. DISCUSIÓN

5.1. *Velocidad de ascenso de las burbujas*

Las disminuciones de plasma generalmente se forman en regiones con grandes gradientes de la densidad de electrones, las cuales existen normalmente en la atmósfera ecuatorial después del ocaso, siempre y cuando las condiciones ambientales como los vientos neutros, el campo eléctrico, la frecuencia de colisión, etc. sean tales que permitan actuar a los mecanismos generadores de la inestabilidad. Estos mecanismos dejan al plasma tan inestable que cualquier perturbación inicial puede crecer en intensidad y amplitud, dando lugar a toda una gama de irregularidades. Se cree que las disminuciones de plas-

ma se generan en la parte más baja de la región F, a través del mecanismo generalizado de inestabilidad de Rayleigh-Taylor. También se acepta que las ondas de gravedad pueden producir la perturbación inicial en la densidad. Una vez que las disminuciones de plasma se han generado, se mueven hacia arriba y hacia el este. La velocidad de desplazamiento hacia el este es igual a la velocidad de deriva del plasma ambiental, mientras que la velocidad de ascenso depende del porcentaje de perturbación respecto de la densidad media del plasma, la geometría de la burbuja, el campo eléctrico local, etc.

Las disminuciones de plasma que se ven en las imágenes del 14 y 15 de abril de 1999 lucen muy diferentes. Las del 14 cubren casi todo el campo de visión, mientras que las del 15 sólo están en la mitad sur del campo. La diferencia se puede entender considerando las distintas velocidades de ascenso, menor para el día 15. Estas velocidades se calcularon desde el momento que las disminuciones de plasma ingresaron al campo de visión, y no son las causantes para que las disminuciones aparezcan sobre el punto de observación. Fagundes et al. (1997) observaron que mientras algunas disminu-

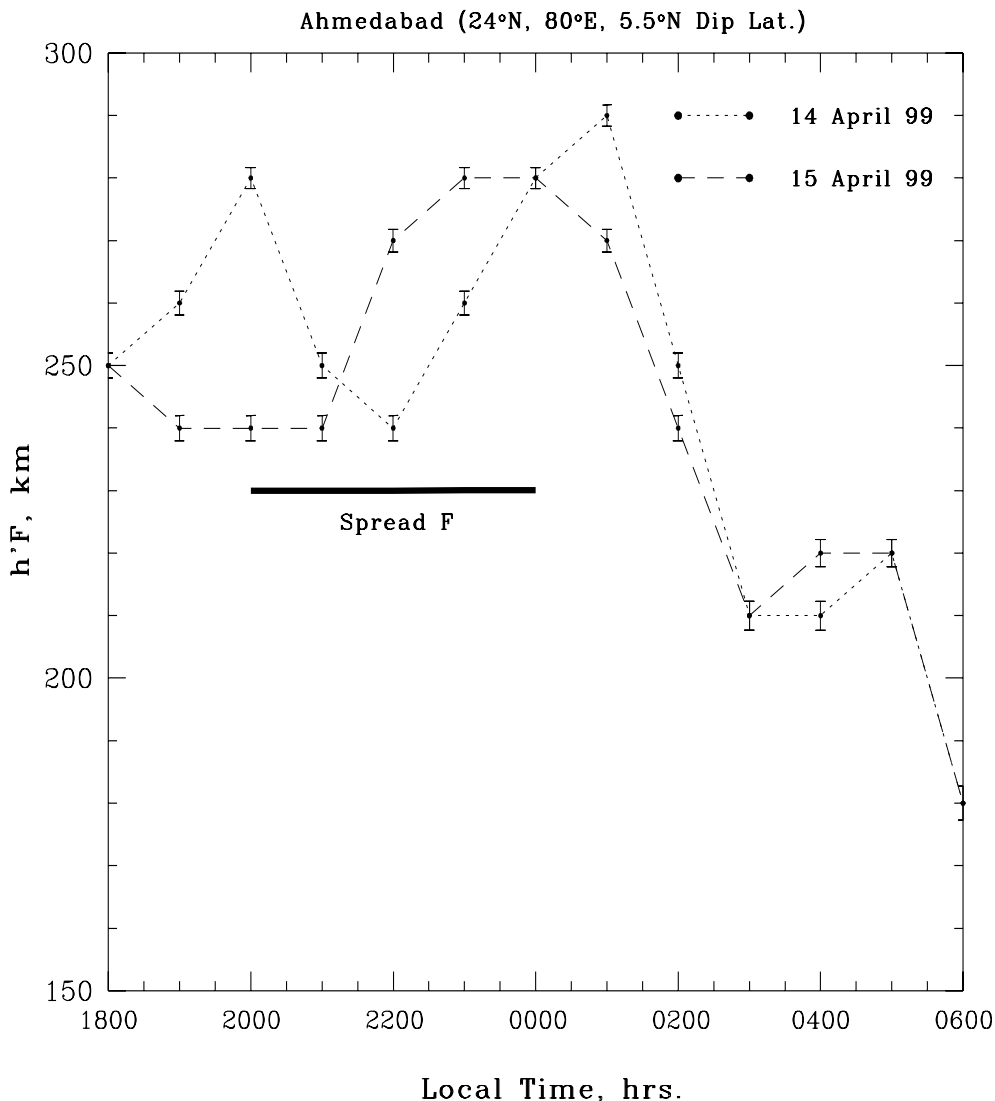


Figura 5. Variaciones de la capa h'F sobre Ahmedabad los días 14 y 15 de Abril de 1999. La línea horizontal indica la duración de la expansión F.

nes de plasma muestran una gran velocidad de ascenso, otras que aparecieron en la misma noche no tienen un movimiento vertical importante. Este fenómeno indica que las disminuciones de plasma que se producen a diferentes tiempos se mueven con diferentes velocidades iniciales, dependiendo de las condiciones iniciales que tenían al formarse.

El trabajo de Ossakow y Chaturvedi (1978) simula los efectos de las condiciones de fondo como el campo eléctrico, la frecuencia de colisión, etc. que éstas tienen

sobre la velocidad de ascenso de las burbujas de plasma a diferentes alturas. Encontraron que el efecto del campo eléctrico es más fuerte a bajas alturas, y a grandes alturas se puede despreciar. El campo eléctrico ambiental también puede afectar el movimiento vertical de las burbujas, si está orientado hacia el este, puede incrementar la velocidad de ascenso, mientras que si está orientado hacia el oeste, tiende a frenar las burbujas de plasma.

La figura 5 muestra el movimiento de la parte inferior de la región F (h'F) durante ambas noches. El 14

de abril, la región F se movió hacia arriba al comenzar el ESF, lo que significa que el campo eléctrico estaba orientado hacia el este. Para el 15 de abril, la base de la región F mostró al comienzo un movimiento hacia abajo, y se mantuvo a baja altura durante las primeras horas de la noche, lo que indica que el campo eléctrico se orientó hacia el oeste durante ese tiempo. Hay que resaltar que la figura 5 está basada sobre la información de los ionogramas tomados en Ahmedabad ($23^{\circ}N$, $72.4^{\circ}E$, $16.8^{\circ}N$ Geomag.) por lo que, en principio, no podrían usarse para inferir las condiciones cerca del ecuador al momento de comenzar las irregularidades. En el ecuador, quien controla la dinámica de plasmas es el campo eléctrico, en cambio, en latitudes extra-ecuatoriales, aparte del campo eléctrico, los vientos neutros tienen un papel importante sobre la dinámica del plasma. El comportamiento de las disminuciones de plasma durante el 14 y 15 de abril de 1999, demuestra que las condiciones del campo eléctrico debieron ser muy similares a las mostradas en la figura 5. El giro del campo eléctrico que ocurrió en ambas noches, no afectó a la velocidad de ascenso de las burbujas debido a que para cuando ocurrió el cambio de orientación, las burbujas se encontraban ya en alturas a las cuales el efecto del campo eléctrico es despreciable, tal como lo demostraron Ossakow y Chaturvedi (1978).

5.2. Esfuerzos de corte en la deriva de plasma

En las imágenes del 14 de abril de 1999, se observó tanto un corte como una nueva adhesión de las disminuciones de plasma. Este es un fenómeno que nunca antes había sido reportado, y lo atribuimos a la aparición de esfuerzos de corte en la velocidad de deriva hacia el este. Aparentemente, la presencia de esos esfuerzos de corte en los extremos norte y sur de la disminución de plasma, las desplazó hacia el este y finalmente las separó en dos unidades diferentes. La porción sur de la disminución de plasma, que se movía con mayor velocidad, se desplazó hacia el este, como si fuese una nueva entidad. En cambio, la porción norte se adhirió a otra disminución de plasma, y se movieron como una sola también hacia el este. Se conoce que existen esfuerzos de corte verticales en los desplazamientos zonales de plasma (Woodman y La Hoz, 1976; Tsunoda et al., 1981; Mendillo y Tyler 1983). Zalesak et al. (1982) demostraron con un modelo no-lineal de las ESF, que la contribución de las líneas de campo a la conductividad de Petersen (proveniente del fondo producido por la región E nocturna en latitudes altas) es capaz de producir esfuerzos de corte en el movimiento del plasma en la dirección este-oeste. Anderson y Mendillo (1983) propusieron la explicación que se debe a que un sistema de vientos zonales, donde la velocidad del viento disminuye con la latitud, podría causar un desplazamiento del plasma hacia el este, el mismo que disminuye con la altura sobre el ecuador magnético.

La evidencia a favor de la presencia de estos esfuerzos de corte se aprecia también en la naturaleza ondulada de algunas de las disminuciones de plasma observadas el 14 de abril de 1999. La inclinación hacia el oeste del

extremo sur de la disminución de plasma que se observó a las 21:15 y a las 21:30 LT, demuestra también que la porción sur tenía mayor velocidad que la porción norte en ese momento. El punto de quiebre de las disminuciones de plasma se ubica en un punto correspondiente a una altura de 400km sobre el ecuador, que resulta estar muy cerca de la región F2.

5.3. Bifurcación de las disminuciones de plasma

Los resultados expuestos en este trabajo, demuestran que el extremo norte de las disminuciones de plasma observadas durante las dos noches se bifurcó. Estas bifurcaciones fueron ya reportadas para imágenes de brillo del aire por Mendillo y Tyler (1983), y también mediante otras técnicas. Tanto Woodman y La Hoz (1976) como Tsunoda et al. (1982) encontraron bifurcaciones de las regiones con menor densidad de plasma a partir de mapas de radar; mientras que Zalesak et al. (1982) encontraron estructuras bifurcadas en los estudios de simulación numérica, y llegaron a la conclusión de que tal caso se presenta cuando se calcula la conductividad de Petersen incluyendo las contribuciones de las regiones E y F. El factor crítico para que se produzca una bifurcación es el cociente de las conductividades interna y externa a las regiones de densidad disminuida. Aggson et al. (1996) reportaron también observaciones *in situ* de burbujas de plasma bifurcadas.

En el caso analizado aquí, la altura a la cual la bifurcación comienza, medida respecto del ecuador, está muy cerca de la región F2. Anderson y Mendillo (1983) calcularon el perfil de la conductividad de Petersen integrada sobre un tubo de flujo y demostraron que si la burbuja de plasma se genera en la base de la región F y se eleva hasta la F2, el cociente de las conductividades es suficiente como para producir una bifurcación. El reporte de Aggson et al. (1996) contiene medidas *in situ* de los campos eléctricos en las ramas que se bifurcan. Los campos eléctricos en las ramas bifurcadas tienen signos opuestos, mostrando así un flujo también opuesto del plasma en cada rama. En el mismo trabajo, también reportan bifurcaciones múltiples de las disminuciones de plasma, con unos patrones muy complejos en cada una de las ramas. Tal como lo indicaron Mendillo y Tyler (1983) nosotros observamos plasmas lineales y con bifurcaciones, uno al lado del otro. Esto es una prueba de que la bifurcación de nuestro caso puede deberse a condiciones estrictamente locales.

La naturaleza de las bifurcaciones, tanto del caso presentado aquí, como de los analizados con anterioridad sugieren que las causas para la bifurcación serían las variaciones locales de los patrones del campo eléctrico local dentro de las burbujas de plasma. Los esfuerzos de cortes en los vientos neutros podrían producir tales cambios en los campos eléctricos, causando la bifurcación. La división y adhesión de las disminuciones de plasma que se observaron en ambas noches de observación indican un gran esfuerzo de corte en el desplazamiento zonal del plasma. Cuando ocurrieron tanto la bifurcación co-

mo la adhesión de las disminuciones de plasma, éstas se encontraban prácticamente fuera del campo de visión del sistema óptico. El tipo de bifurcación de las disminuciones de plasma que se observó en ambas noches demuestra que el mecanismo que las produjo no está comprendido completamente, y se requiere de experimentos coordinados para medir tanto el campo eléctrico como los patrones de flujo del plasma dentro de las zonas de bifurcación, conjuntamente con observaciones efectuadas desde la superficie terrestre.

6. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue patrocinado por el Physical Research Laboratory, Ahmedabad, India.

REFERENCIAS

- [1] Abalde, J.R., P.R.Fagundes, J.A.Bittencourt y Y.Sahai. Observations of equatorial F region plasma bubbles using simultaneous OI 777.4nm and OI 630.0nm imaging: New results, *J. Geophys. Res.*, **106**, 30,331-30,336, 2001.
- [2] Aggson, T.L., H.Laakso, N.C.Maynard y R.F.Pfaff, In situ observations of bifurcation of equatorial ionospheric plasma depletions, *J. Geophys. Res.*, **101**, 5125-5132, 1996.
- [3] Anderson, D.N. y M.Mendillo. Ionospheric conditions affecting the evolution of equatorial plasma depletions, *Geophys.Res.Lett.*, **10**, 541-544, 1983.
- [4] Colerico, M., M.Mendillo, D.Nottingham, J.Baumgardner, J.Meriwether, J.Mirick, B.W.Reinisch, J.L.Scali, C.G.Fesen, y M.A.Biondi, Coordinated measurements of F-region dynamics related to the thermospheric midnight temperature maximum, *J.Geophys. Res.*, **101**, 26,783-26,793, 1996.
- [5] Fagundes, P.R., Y.Sahai, I.S.Batista, M.A.Abdu, J.A.Bittencourt y H.Takahashi, Vertical and zonal equatorial F-region plasma bubble velocities determined from OI 630nm nightglow imaging, *Adv. Space Res.*, **20(6)**, 1297-1300, 1997.
- [6] Mendillo, M. y A.Tyler, Geometry of depleted plasma regions in the equatorial ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **88**, 5778-5782, 1983.
- [7] Mendillo, M. y J.Baumgardner, Airglow characteristics of equatorial plasma depletions, *J.Geophys. Res.*, **87**, 7641-7652, 1982.
- [8] Mendillo, M., J.Baumgardner, M.Colerico y D.Nottingham. Imaging science contributions to equatorial aeronomy: initial results from the MISETA program, *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, **59**, 1587-1599, 1997a.
- [9] Mendillo, M., J.Baumgardner, D.Nottingham, J.Aarons, B.Renisch, J.Scali y M.C.Kelley, Investigations of thermospheric-ionospheric dynamics with 6300Å images from the Arecibo Observatory, *J. Geophys. Res.*, **102 (A4)**, 7331-7343, 1997b.
- [10] Ossakow, S.L. y P.K.Chaturvedi, Morphological studies of rising equatorial spread F bubbles, *J. Geophys. Res.*, **83**, 2085-2090, 1978.
- [11] Sahai, Y., J.Aarons, M.Mendillo, J.Baumgardner, J.A.Bittencourt y H.Takahashi, OI 630nm imaging observations of equatorial plasma depletions at 16° dip latitude, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **56**, 11,1461-1475, 1994.
- [12] Sales, G.S., B.W.Reinisch, J.L.Scali y C.Doizois. Spread F and structure of equatorial ionisation depletions in the southern anomaly region, *J. Geophys. Res.*, **101**, 26,819-26,827, 1996.
- [13] Sinha, H.S.S. y S.Raizada, Some new features of ionospheric plasma depletions over the Indian zone using all sky optical imaging, *Earth Planets and Space*, **52**, 540-559, 2000.
- [14] Sinha, H.S.S., R.N.Misra, H.Chandra, S.Raizada, N.Dutt y G.D.Vyas, Multi-wavelength optical imaging of ionospheric plasma depletions, *Ind. J. of Rad. and Space Phys.*, **25**, 44-52, 1996.
- [15] Sinha, H.S.S., P.K.Rajesh, R.N.Misra, y N.Dutt. Multi-wavelength imaging observations of plasma depletions over Kavalur, India, *Ann. Geophys.*, **19**, 1119-1131, 2001.
- [16] Tsunoda, R.T., R.C.Livingston y C.L.Rino, Evidence of a velocity shear in bulk plasma motion associated with the post sunset rise of the F layer, *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 807-810, 1981.
- [17] Tsunoda, R.T., R.C.Livingston, J.P.McClure y W.B.Hanson, Equatorial plasma bubbles: Vertically elongated wedges from the bottomside F layer, *J. Geophys. Res.*, **87**, 9171-9180, 1982.
- [18] Weber, E.J., S.Basu, T.W.Bullett, C.Valladares, G.Bishop, K.Groves, H.Kuenzler, P.Ning., P.J.Sultan, R.E.Sheehan y J.Aranya. Equatorial plasma depletion precursor signatures and onset observed at 11° south of the magnetic equator, *J. Geophys. Res.*, **101**, 26,829-26,838, 1996.
- [19] Woodman, R.F. y C.La Hoz, Radar observations of F region equatorial irregularities, *J. Geophys. Res.*, **81**, 5447-5466, 1976.
- [20] Zalesak, S.T. y S.L.Ossakow, and P.K.Chaturvedi, Non-linear Equatorial spread F : The effects of neutral winds and background Pederson conductivity, *J. Geophys. Res.*, **87**, 151-166, 1982.