

# ESTUDO DAS IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS UTILIZANDO GPS: DETERMINAÇÃO DE SUAS VELOCIDADES ZONAIS E SUAS INFLUÊNCIAS NOS SISTEMAS DE POSICIONAMENTO

Marco Aurélio Diniz

Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP - Bolsa PIBIC/CNPq  
Orientadores: Dr. Eurico Rodrigues de Paula, Pesquisador Titular – DAE  
Dr. Ivan Jelinek Kantor, Pesquisador Titular - DAE

As irregularidades do plasma ionosférico são geradas na região equatorial por processos de instabilidade do plasma logo após o pôr do Sol e podem estender a cerca de 10.000 km ao longo das linhas de campo magnético e algumas centenas de quilômetros na direção zonal (leste-oeste), formando imensas regiões com rarefação de plasma em seu interior denominadas bolhas ionosféricas. Estas bolhas apresentam campos elétricos zonais intensificados e irregularidades de plasma de vários tamanhos de escala nas suas bordas. Os mecanismos que geram e que determinam a evolução destas irregularidades são bem complexos e maiores estudos, tanto através de medidas de diversos sondadores ionosféricos quanto de teorias e modelos teóricos, se fazem necessários para compreendê-los. As irregularidades ionosféricas, que podem ter escalas de tamanho de centímetros a quilômetros, causam fortes cintilações na fase e na amplitude dos sinais eletromagnéticos que as atravessam, afetando substancialmente as comunicações satélite-Terra e os sistemas globais de posicionamento (GPS). As irregularidades podem até mesmo causar black-outs nas telecomunicações e erros ou falhas nos sistemas de posicionamento por GPS. O sistema GPS consiste de 24 satélites operacionais em órbitas circulares e localizados a 20.200 km de altitude, os quais transmitem sinais em frequências na banda L (1,57542 e 1,2276 GHz) e possibilita o estudo das irregularidades ionosféricas pois o sinais recebidos pelos receptores GPS cintilam ao atravessá-las. Quatro placas de GPS, doadas pela Universidade de Cornell, foram instaladas em 4 micros. Estas placas possuem a capacidade de medir a intensidade dos sinais dos satélites GPS na frequência de 1,57542 GHz com uma alta taxa (50 amostras/segundo) e possuem 12 canais que processam digitalmente o sinal recebido simultaneamente de até 12 satélites que estão acima do horizonte. Neste trabalho dados das amplitudes dos sinais dos receptores de GPS localizados em São Luís, São José dos Campos e de dois receptores espaçados em Cachoeira Paulista foram analisados para se estudar a estatística e a morfologia da ocorrência das irregularidades ionosféricas, suas velocidades zonais e os seus efeitos sobre os sistemas de posicionamento por GPS. Foi observado que a ocorrência das irregularidades ionosféricas é de setembro a março em nosso setor de longitude, comprovando observações por ionossondas. As velocidades zonais das bolhas determinadas por correlação cruzada entre os picos da cintilação dos dados de 2 receptores de GPS espaçados foram calculadas para o período de 6 a 19 de novembro de 1998 em Cachoeira Paulista e elas foram da ordem de 150 m/s para leste. nas primeiras horas após o pôr do Sol, tendendo a diminuir de amplitude próximo da meia noite. Na noite de 13/14, que foi magneticamente perturbada, observou-se que a velocidade da bolha após meia noite foi para oeste e com amplitude que cresceu até cerca de 150 m/s às 5:30 horas locais. Medidas destas velocidades zonais das bolhas em Cachoeira Paulista estão sendo feitas rotineiramente desde dezembro de 1998. A análise dos dados de cintilação dos receptores de GPS durante irregularidades ionosféricas mostrou que os sistemas de posicionamento por GPS apresentam grandes erros ou até mesmo falhas ao se determinar as coordenadas geográficas das estações receptoras. Foi observado que falhas nos sistemas DGPS (GPS diferencial) de posicionamento das plataformas e de navios de prospecção de petróleo na bacia de Campos, RJ, se correlacionam com as ocorrências de bolhas ionosféricas detectadas pelo receptor de GPS de São José dos Campos. Os receptores de GPS que estamos operando, mostraram ser bem úteis para se estudar as irregularidades ionosféricas, apesar de serem equipamentos bem simples e que podem ser instalados facilmente em um micro..

## **RELATÓRIO DE BOLSA PIBIC**

### **ESTUDO DAS IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS UTILIZANDO GPS**

Aluno: Marco Aurélio Diniz (Substituto de Francilei Campos de Oliveira)

Período: agosto/98-julho/99

Processo: 102811/98-9

Orientadores: Eurico Rodrigues de Paula e Ivan Jelinek Kantor

#### **1-INTRODUÇÃO**

As irregularidades do plasma ionosférico são geradas na região equatorial por processos de instabilidade do plasma logo após o pôr do Sol e podem estender a cerca de 10.000 km ao longo das linhas de campo magnético e algumas centenas de quilômetros na direção zonal (leste-oeste), formando imensas regiões com rarefação de plasma em seu interior denominadas bolhas ionosféricas. Estas bolhas apresentam campos elétricos zonais intensificados e irregularidades de plasma de vários tamanhos de escala nas suas bordas. Os mecanismos que geram e que determinam a evolução destas irregularidades são bem complexos e maiores estudos, tanto através de medidas de diversos sondadores ionosféricos quanto de teorias e modelos teóricos, se fazem necessários para compreendê-los. As irregularidades ionosféricas, que podem ter escalas de tamanho de centímetros a quilômetros, causam fortes cintilações na fase e na amplitude dos sinais eletromagnéticos que as atravessam, afetando substancialmente as comunicações satélite-Terra e os sistemas globais de posicionamento (GPS). As irregularidades podem até mesmo causar black-outs nas telecomunicações e erros ou falhas nos sistemas de posicionamento por GPS. O sistema GPS consiste de 24 satélites operacionais em órbitas circulares e localizados a 20.200 km

de altitude, os quais transmitem sinais em frequências na banda L (1,57542 e 1,2276 GHz) e possibilita o estudo das irregularidades ionosféricas pois o sinais recebidos pelos receptores GPS cintilam ao atravessá-las. Quatro placas de GPS, doadas pela Universidade de Cornell, foram instaladas em 4 micros. Estas placas possuem a capacidade de medir a intensidade dos sinais dos satélites GPS na frequência de 1,57542 GHz com uma alta taxa (50 amostras/segundo) e possuem 12 canais que processam digitalmente o sinal recebido simultaneamente de até 12 satélites que estão acima do horizonte. Existem vários instrumentos de sondagem ionosférica, cada um operando em uma frequência diferente, que possibilitam o estudo das bolhas ionosféricas e como estas possuem em seu interior irregularidades de diversos tamanhos de escala, o sinal de cada equipamento é influenciado por estruturas de tamanhos diferentes (centímetros a quilômetros). O sinal do GPS em 1,57542 GHz, com comprimento de onda de 19 cm, cintila quando cruza com irregularidades desta ordem de tamanho e portanto pode ser utilizado para estudá-las. Neste trabalho, dados das amplitudes dos sinais dos receptores de GPS localizados em São Luís, São José dos Campos e de dois receptores espaçados em Cachoeira Paulista foram analisados para se estudar a estatística e a morfologia da ocorrência das irregularidades ionosféricas, suas velocidades zonais e os seus efeitos sobre os sistemas de posicionamento por GPS.

## **2-OBJETIVOS CIENTÍFICOS**

Utilizando medidas da amplitude do sinal recebido por receptores de GPS estamos desenvolvendo as seguintes pesquisas:

- a)-estudo da ocorrência de irregularidades ionosféricas em São José dos Campos e São Luís para determinação de suas estatísticas, morfologias e variações longitudinais e latitudinais;
- b)-estudo do efeito das irregularidades ionosféricas nos sistemas de posicionamento por GPS;
- c)-determinação da velocidade leste-oeste (zonal) das bolhas em Cachoeira Paulista e entre Cachoeira Paulista e São José dos Campos utilizando dados de sistemas de receptores de GPS espaçados.

### **3-DESENVOLVIMENTO DO PROJETO**

#### **a)-Estudo da ocorrência de irregularidades ionosféricas**

Dados do receptor de GPS de São José dos Campos foram analisados e a porcentagem de ocorrência para cada mês desde setembro de 1997 até abril de 1998 foi determinada. A Figura 1 mostra a porcentagem de ocorrência para este período, onde o índice de cintilação S4 é o desvio padrão da potência do sinal recebido dividido por sua média e calculado para cada um minuto utilizando 3.000 pontos ( taxa de amostragem é de 50 amostras/segundo). O índice S4 dá uma indicação quantitativa da intensidade da cintilação. Observamos que o período de ocorrência das cintilações para o nosso setor de longitude, vai de setembro a abril, intensificando em novembro, dezembro e janeiro. Também a porcentagem de ocorrência em função da hora local foi analisada e observamos que esta é maior em torno de 22:30 LT e com um maior índice S4 em torno de 20:30 LT conforme pode ser notado na Figura 2. Este tipo de análise foi realizado para o período de 97-98 e para São José dos Campos e vamos estendê-la para São Luís e para o último período de ocorrência de irregularidades que foi setembro/98 a abril/99. Para se estudar a variação longitudinal e latitudinal das ocorrência das irregularidades ionosféricas analisamos dados simultâneos de estações receptoras de GPS de várias localidades. A Figura 3 mostra um exemplo da trajetória de um satélite e do ponto subionosférico para as estações receptoras de São José dos Campos e de São Luís para o dia 03 de dezembro de 1998. Nesta figura os pequenos círculos ao longo da trajetória dos pontos subionosféricos representam regiões de ocorrência de irregularidades. Este tipo de gráfico possibilita analisar a extensão espacial e temporal das irregularidades e foi desenvolvido no software IDL. Dados das estações de Natal e de Tucumán, Argentina podem ser incluídos nesta figura, fornecendo uma melhor distribuição espacial e temporal das irregularidades.

## **b)- Efeito das irregularidades no posicionamento por GPS**

Através de nossos estudos constatamos que a incidência de irregularidades ionosféricas, as quais ocorrem principalmente entre 20 e 24 LT em nosso setor de longitude podem afetar significativamente o posicionamento por GPS ou até mesmo causar falhas neste posicionamento. A Figura 4a mostra a posição (latitude, longitude e altitude) do receptor de GPS de São José dos Campos durante a ocorrência de bolhas para a noite de 23 de outubro de 1998. Uma sequência de fotos de imageador all-sky de Cachoeira Paulista (Figura 4b) indica a incidência de bolhas (raias escuras) para o mesmo dia em que foram feitos os gráficos da posição da estação. Pelas Figuras 4a e 4b pode-se observar que as irregularidades ionosféricas afetam consideravelmente o posicionamento por GPS entre 20 e 24 horas locais. Na Figura 4c estão mostradas as imagens das linhas 6300 e 5577 Angstroms do dia 18 de março de 1999 obtidas pelo imageador do Dr. Mike Taylor, localizado em Cachoeira Paulista, a qual apresenta uma resolução bem melhor do que as imagens da Figura 4b e imagens deste imageador com melhor resolução serão analisadas. Nos foi comunicado pelos engenheiros da Petrobrás que os sistemas de posicionamento das plataformas e navios que utilizam DGPS (GPS diferencial) estavam apresentando falhas entre 20 e 24 horas locais a partir de setembro. Como este horário e meses de ocorrência coincidem com os de ocorrência de bolhas detectadas em nosso receptor de GPS de São José dos Campos, decidimos analisar se havia correlação entre estes fenômenos. A Figura 5 mostra a correlação entre a ocorrência de bolhas em São José dos Campos e falhas nos sistemas de posicionamento por DGPS (GPS Diferencial) das plataformas e navios de prospeção de petróleo na bacia de Campos, Rio de Janeiro, para o período de 29/09/98 a 03/11/98. Esta figura mostra que existe uma boa correlação entre os eventos, ou seja, na grande maioria das noites em que foram observadas cintilações no receptor de GPS de São José dos Campos ocorreram falhas nos sistemas de posicionamento por DGPS em Campos.

## **C)-Determinação da velocidade leste-oeste (zonal) das bolhas**

As bolhas ionosféricas já maduras, sem a incidência de tempestades magnéticas migram para leste relativo ao solo e durante tempestades magnéticas podem inverter esta direção,

ou seja, podem migrar para oeste. A determinação da velocidade zonal das bolhas é importante para se compreender os seus mecanismos de geração e evolução. De 6 a 19 de novembro de 1998 instalamos em Cachoeira Paulista, em colaboração com a Universidade de Cornell, 4 receptores de GPS, sendo 3 espaçados na direção leste-oeste magnética e um na direção norte-sul magnética. Também foi instalado durante esta campanha um receptor de que mede o Conteúdo Eletrônico Total (CET) e suas cintilações durante a passagem de bolhas. A Figura 6 mostra o diagrama da posição relativa destes 4 receptores de GPS. A Figura 7 mostra a potência do sinal recebido, o índice S4 e o CET para os satélites 14 e 15 para a noite de 10/11 de novembro de 1998. Pode-se observar que ocorreram fortes cintilações na potência do sinal recebido por ambos satélites e simultâneas com cintilações no CET e intensificação do índice S4 durante a ocorrência de bolhas. A Figura 8 mostra o gráfico elevação-azimute dos satélites 14 e 15 e a envoltória ao longo da trajetória é a amplitude do índice S4. A linha tracejada indica a direção norte-sul magnética. Forte cintilação da amplitude do sinal destes satélites foram observadas em torno de 22-23 LT e a área escura corresponde a este intervalo de tempo. Como a amplitude do sinal recebido pelos receptores GPS espaçados apresentam cintilações durante a ocorrência das irregularidades ionosféricas e como a bolha tem velocidade zonal é possível utilizando o método da correlação cruzada entre os picos das amplitudes dos sinais recebidos nos receptores espaçados calcular a velocidade zonal das irregularidades. A Figura 9a mostra a potência (amplitude) do sinal do satélite 14 e a Figura 9b mostra o índice de correlação cruzada e o número de amostras necessárias para se ter correlação máxima entre os picos (offset number) para o intervalo de tempo de 22:30 até 22:32 LT para o dia 10 de novembro de 1998. Pode-se observar na Figura 9a que os picos das cintilações ocorrem primeiro para o receptor D, depois para o E e depois para o F, os quais se encontravam espaçados de oeste para leste magnético, dando a indicação de que as irregularidades estavam migrando para leste. O “offset number” permite quantificar esta velocidade zonal pois o espaçamento entre os receptores é conhecido. Nenhum deslocamento na direção norte-sul foi observado conforme pode-se notar na Figura 9a que houve coincidência temporal entre os picos das cintilações dos receptores E e G que estão espaçados nesta direção. A Figura 10 mostra o “offset number”, a velocidade leste-oeste do ponto subionosférico devida à velocidade do satélite e que deve ser somada ou subtraída à velocidade das irregularidades determinada

pela correlação cruzada e a velocidade zonal das bolhas, para os satélites 14 e 15. Observa-se que esta velocidade é cerca de 140 m/s para leste. Como esta velocidade foi determinada a partir das cintilações rápidas ela representa a velocidade das irregularidades de pequena escala de tamanho. Outro método de determinação da velocidade zonal das irregularidades de grande escala de tamanho (bolhas) é através do estudo da envoltória do índice S4 para um sistema GPS espaçado em que um receptor se encontra em Cachoeira Paulista (CP) e o outro em São José dos Campos (SJC), locais estes espaçados cerca de 110 km na direção leste-oeste magnética. Para comparar as velocidades destas irregularidades de tamanhos diferentes e usando estes 2 métodos diferentes, os dados de 1-18 de dezembro de 1998 foram analisados para os dois sistemas espaçados (CP-CP e CP-SJC) e a velocidade zonal das irregularidades foi determinada por estes 2 processos (defasamento entre os picos da cintilação de 2 receptores espaçados na direção leste-oeste magnética por 55m em CP e defasamento entre as envoltórias do índice S4 de CP e SJC conforme Figura 11). A Figura 12 mostra as velocidades zonais determinadas pelos dois métodos. Observa-se que o comportamento das curvas é bem semelhante, entretanto a velocidade determinada pelo método da envoltória do índice S4 para estruturas de grande tamanho de escala é bem maior em todas as horas do que as velocidades calculadas pelo método da correlação cruzada para as irregularidades de tamanho de escala pequeno. Precisamos agora analisar o motivo das discrepâncias entre estas velocidades calculadas por estes 2 métodos. Uma possibilidade é que as irregularidades de pequena escala e que ficam dentro das bolhas possuem velocidade menor do que a velocidade das bolhas.

#### **4- CONCLUSÕES**

Durante os 12 meses desta bolsa PIBIC/CNPq muitas atividades de pesquisa foram realizadas com auxílio do bolsista Francilei Campos de Oliveira e Marco Aurélio Diniz que o substituiu a partir de maio de 1999. Vários softwares em C++ e Matlab foram desenvolvidos por eles visando o tratamento e análise dos dados de GPS. O nosso projeto de estudo das irregularidades ionosféricas, que inicialmente era baseado em apenas um receptor de GPS em São José dos Campos, cresceu com apoio da FAPESP, Universidade de Cornell, INPE e CNPq (bolsa PIBIC) e atualmente dispomos de 4 receptores de GPS,

sendo que 2 estão em Cachoeira Paulista (espaçados na direção leste-oeste magnética), um está em São José dos Campos e outro foi instalado em São Luís na região equatorial. Softwares em IDL estão também sendo desenvolvidos para melhor apresentação dos dados de GPS. Portanto com auxílio do bolsista PIBIC e utilizando dados de GPS conseguimos analisar a estatística, morfologia e variação latitudinal e longitudinal das irregularidades. Foi também calculada a velocidade zonal das irregularidades ionosféricas em Cachoeira Paulista e os efeitos das irregularidades ionosféricas nos sistemas de posicionamento por GPS foram analisados. Desta pesquisa resultaram 5 trabalhos em congressos e um trabalho submetido ao Journal of Geophysical Research em junho de 1999. Também neste período colaboramos com a UFRN, Cornell, Universidade Nacional de Tucumán, Univap e estamos iniciando colaboração com a UNESP de Presidente Prudente.

## **5- TRABALHOS FUTUROS**

As seguintes atividades de pesquisa deverão ser realizadas:

- continuação da operação dos 4 receptores de GPS;
- continuação do cálculo da velocidade zonal das irregularidades ionosféricas utilizando os receptores espaçados de Cachoeira Paulista e São José dos Campos;
- comparação da velocidade zonal das irregularidades com velocidades zonais calculadas por imageadores all-sky.
- estudo da estatística de ocorrência das irregularidades, sua morfologia e sua variação latitudinal e longitudinal através da comparação com dados de GPS semelhantes de outras estações;
- continuação do estudo dos efeitos das irregularidades ionosféricas nos sistemas de posicionamento por GPS;
- estudo dos efeitos das tempestades magnéticas utilizando dados de GPS;



## 6-REFERÊNCIAS

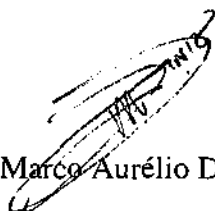
- Abdu. M.A., H. Takahashi, I.S. Batista, J.H.A. Sobral, E.R. de Paula, N.B. Trivedi, A.F. Medeiros, Equatorial plasma bubble development and zonal drift during the 26 August 1998 magnetic storm, accepted to IAGA meeting, Birmingham, July, 1999.
- Beach, T.L., Global Positioning system studies of equatorial scintillations, PhD Dissertation, Cornell University, 1998.
- Campos, M.A., L.Wanninger, Cintilações equatoriais e desempenho do receptor GPS, Boletim de Ciências Geodésicas, vol. 2, p 39-45, Curitiba, 1997.
- Fagundes, P.R., E.R. de Paula, Y. Sahai, Simultaneous GPS and OI 6300 all-sky imaging Observations during large scale equatorial ionospheric irregularities, accepted to IUGG99 Conference, Birmingham, UK, July, 1999.
- Fejer, B.G., D.L. Hysell, E.R. de Paula, Longitudinal studies of equatorial spread-F in the American sector, Ionospheric Effects Symposium, Alexandria, Virginia, USA, May 4-6, 1999.
- Kil, H., P.M. Kintner, E.R. de Paula, I.J. Kantor, GPS measurements of the ionospheric Zonal drift velocity at Cachoeira Paulista in Brazil, submitted to J. Geophys. Res., 1999.
- Hoffman-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, J.Collins, GPS theory and practice, Springer-Verlag Wien New York, 1994.
- Parkinson, B.W., J.J. Spilker Jr. (Eds.), Global positioning system; theory and applications, Vol. 1, Progress in Astronautics, vol-163, 1996.
- de Paula, E. R., A.A. Pallaoro, P.M. Kintner, T.L.Beach, H. Kil, I.J. Kantor, J.H.A. Sobral, I.S. Batista, M.A. Abdu, F.C. de Oliveira, Ionospheric scintillation effects on DGPS

Positioning, accepted to SBGf meeting, Rio de Janeiro, August 1999.


Sobral, J.H.A., E.R. de Paula, I.J. Kantor, I.S. Batista, M.A. Abdu, Ionospheric plasma Bubble research in the South American sector, in Proceedings of Station Keeping Seminar, Petrobrás-International Marine Contractors (IMC), Rio de Janeiro, November 7, 1998.

## 6-AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq pelo apoio financeiro aos bolsistas através da bolsa PIBIC processo 102811/98-9, à FAPESP pelo apoio financeiro para aquisição dos equipamentos do projeto e à Universidade de Cornell pela doação dos sistemas de GPS e pela valiosa colaboração. Todos estes apoios contribuíram para que os objetivos científicos propostos fossem alcançados e contribuirão para que outros sejam concluídos. Estamos também gratos ao colega do INPE, Dr. Mário Ricci pela eficiência na coordenação das bolsas PIBIC em nosso instituto.



Marco Aurélio Diniz



Eurico Rodrigues de Paula

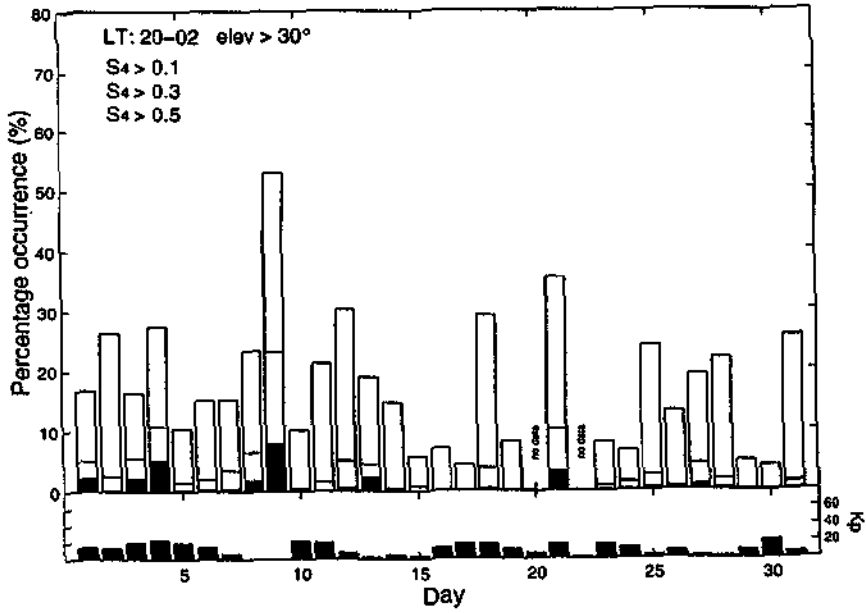


Ivan Jelinek Kantor

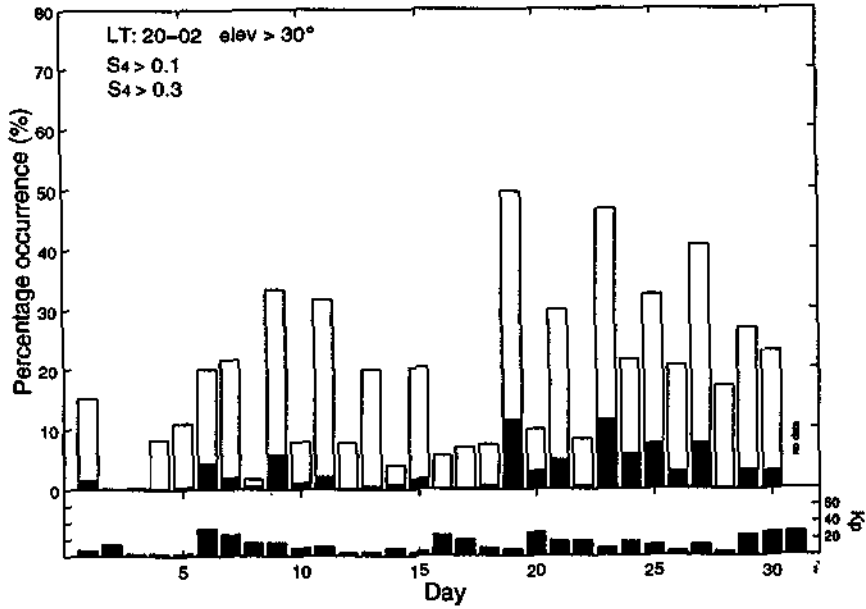
São José dos Campos, 28 de junho de 1999.



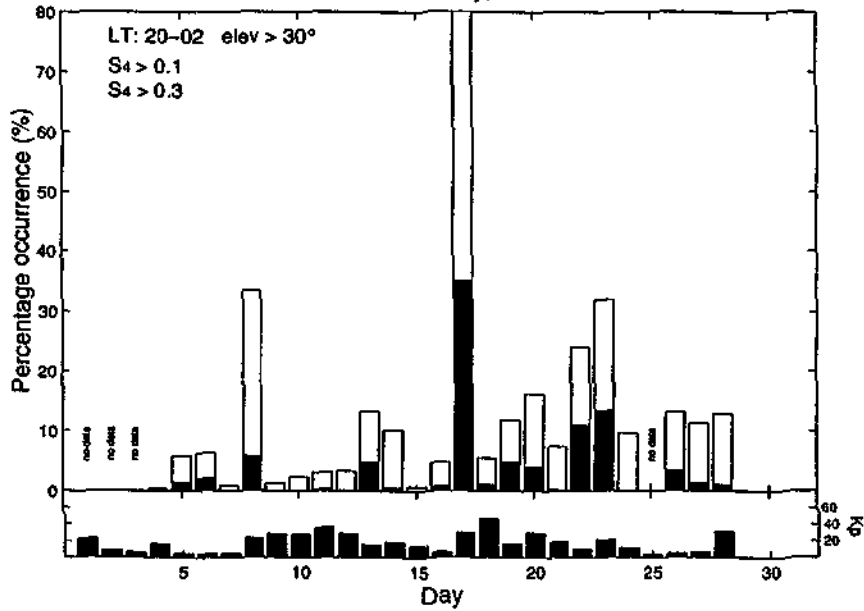
SJC: December, 1997



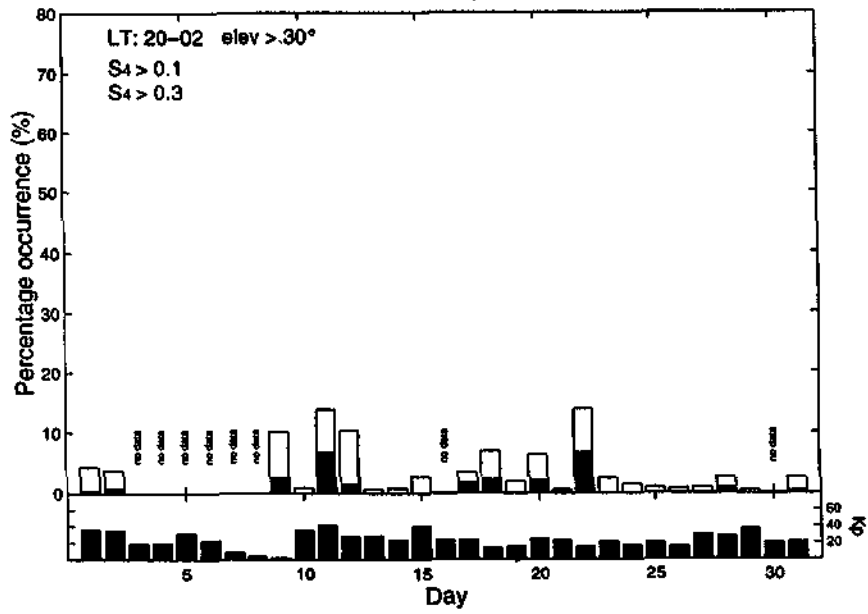
SJC: January, 1998



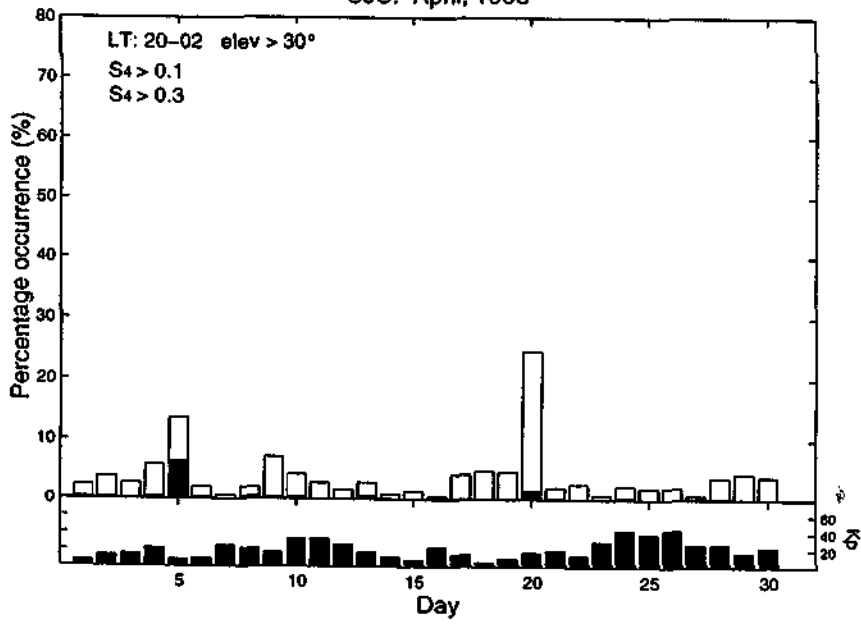
SJC: February, 1998



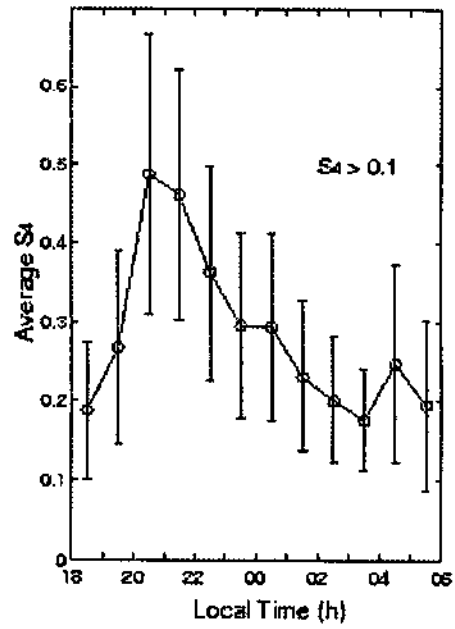
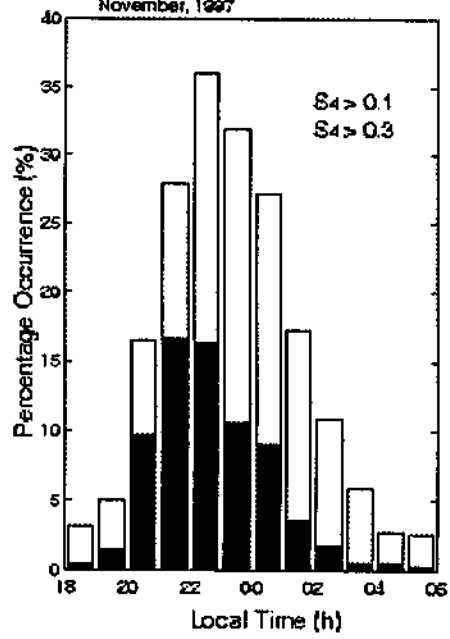
SJC: March, 1998



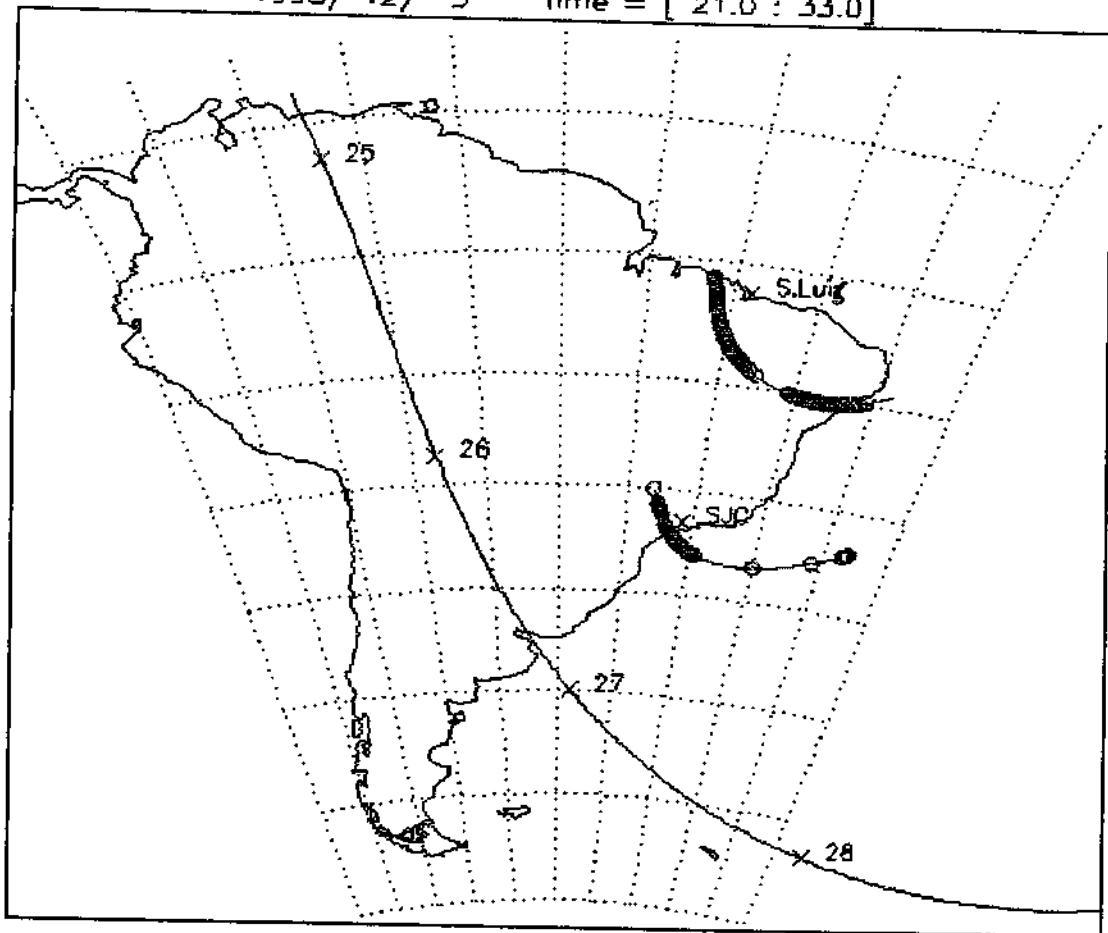
SJC: April, 1998



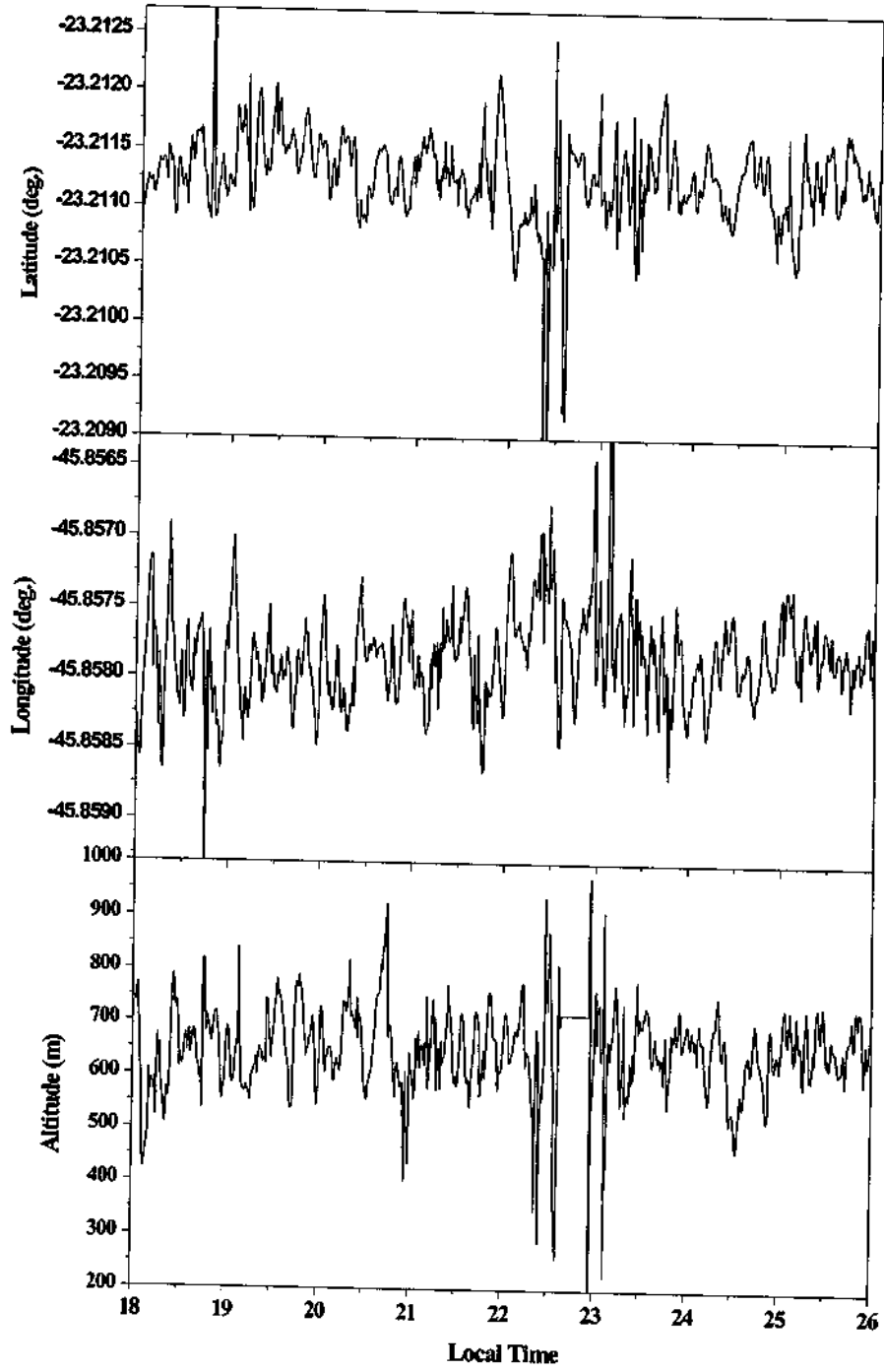
SAO JOSE DOS CAMPOS BRAZIL  
 ABC 1997 CAMPAIGN  
 November, 1997



1998/ 12/ 3 time = [ 21.0 : 33.0]



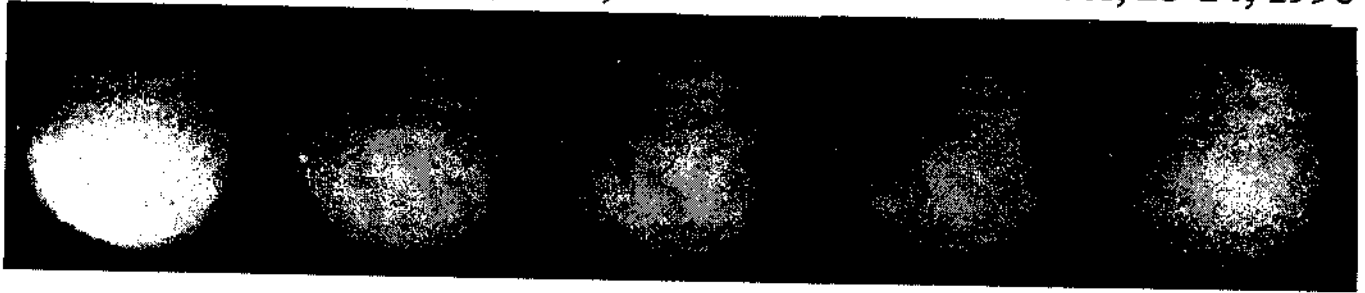
October 23, 1998





**Cachoeira Paulista (23 S, 45W) North**

**October, 23-24, 1998**



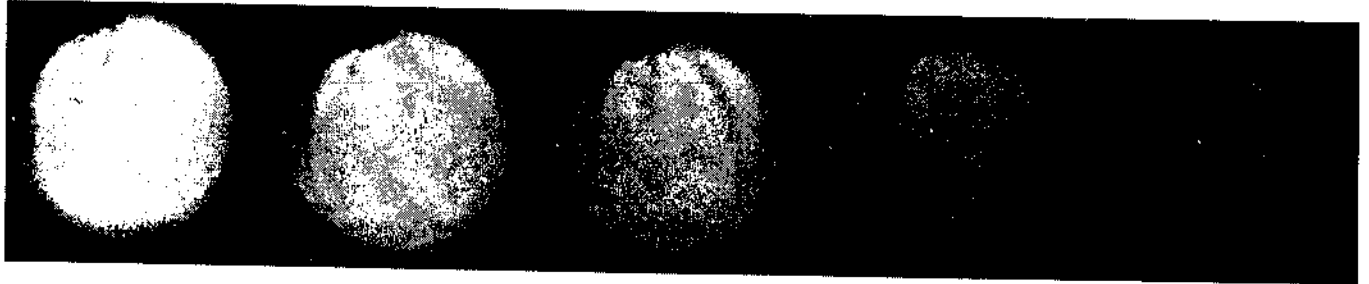
19:20

19:40

20:00

20:20

20:40



21:00

21:20

21:40

22:00

22:20

**West**



22:40

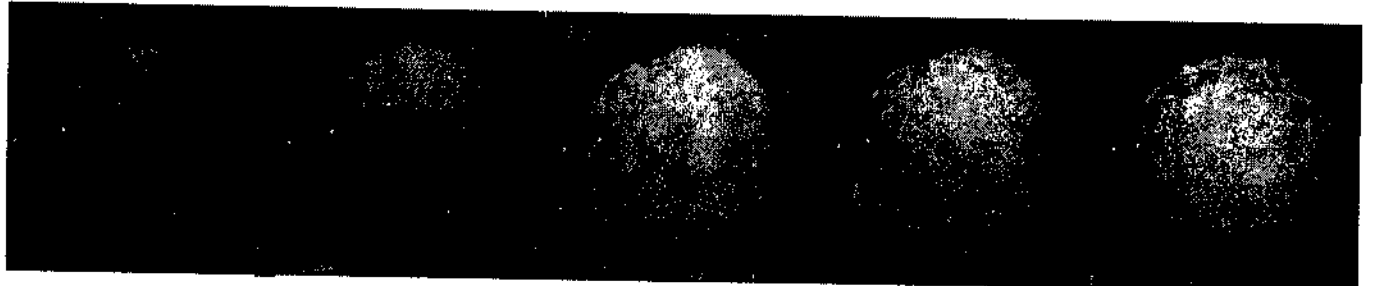
23:00

23:20

23:40

00:00

**East**



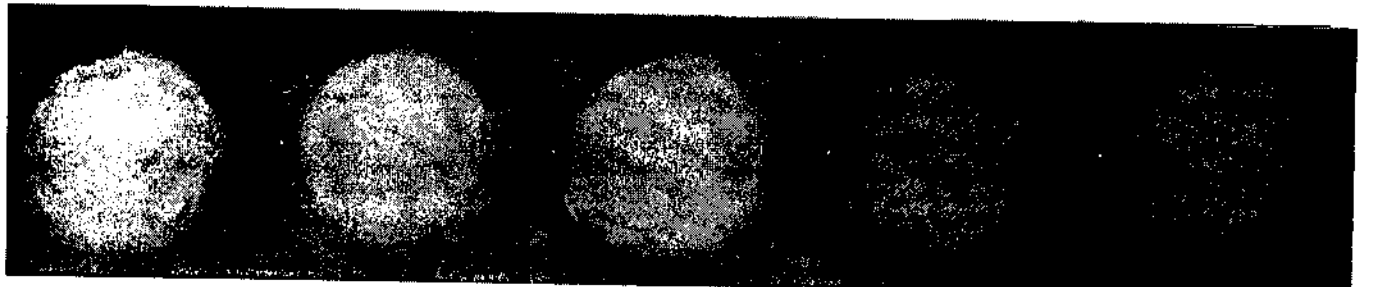
00:20

00:40

1:00

1:20

1:40



2:00

2:20

3:00

3:40

4:00

**South**

Daniela 4/5/9

Imagens MTaylor

Sem filtro

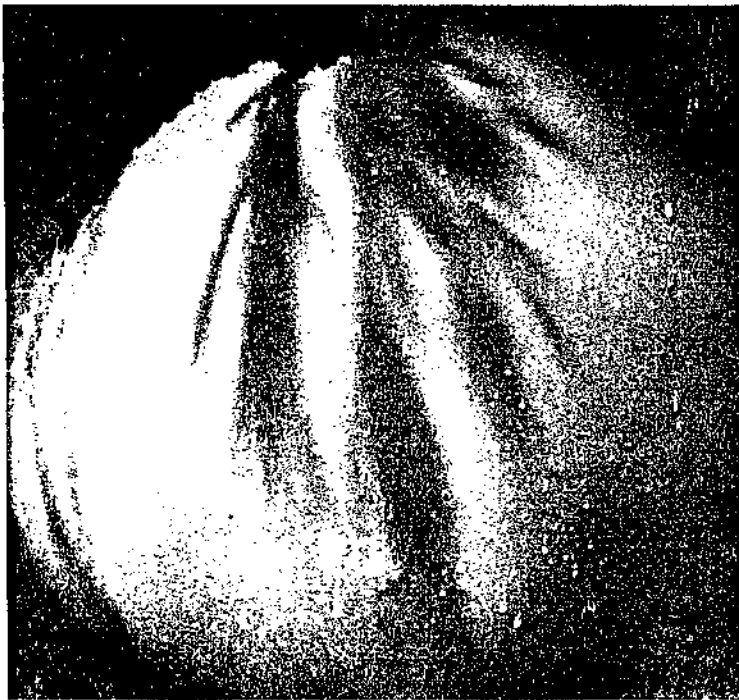
OK

CP55\_60 01:46 UT

C. Paulista, 1999.03.18  
(DAY 77)



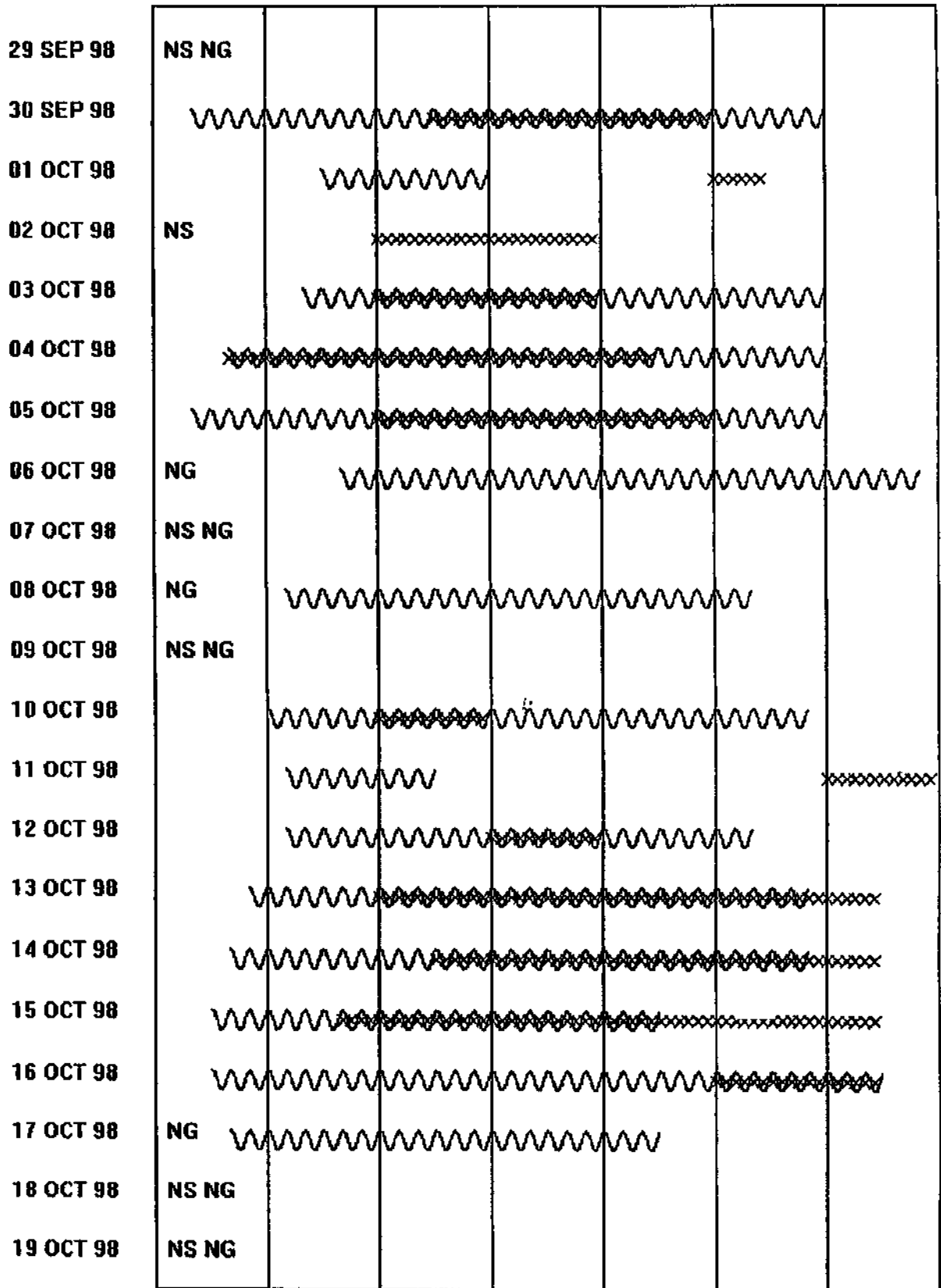
6300 - 01:44 UT



CP63\_30 01:44 UT

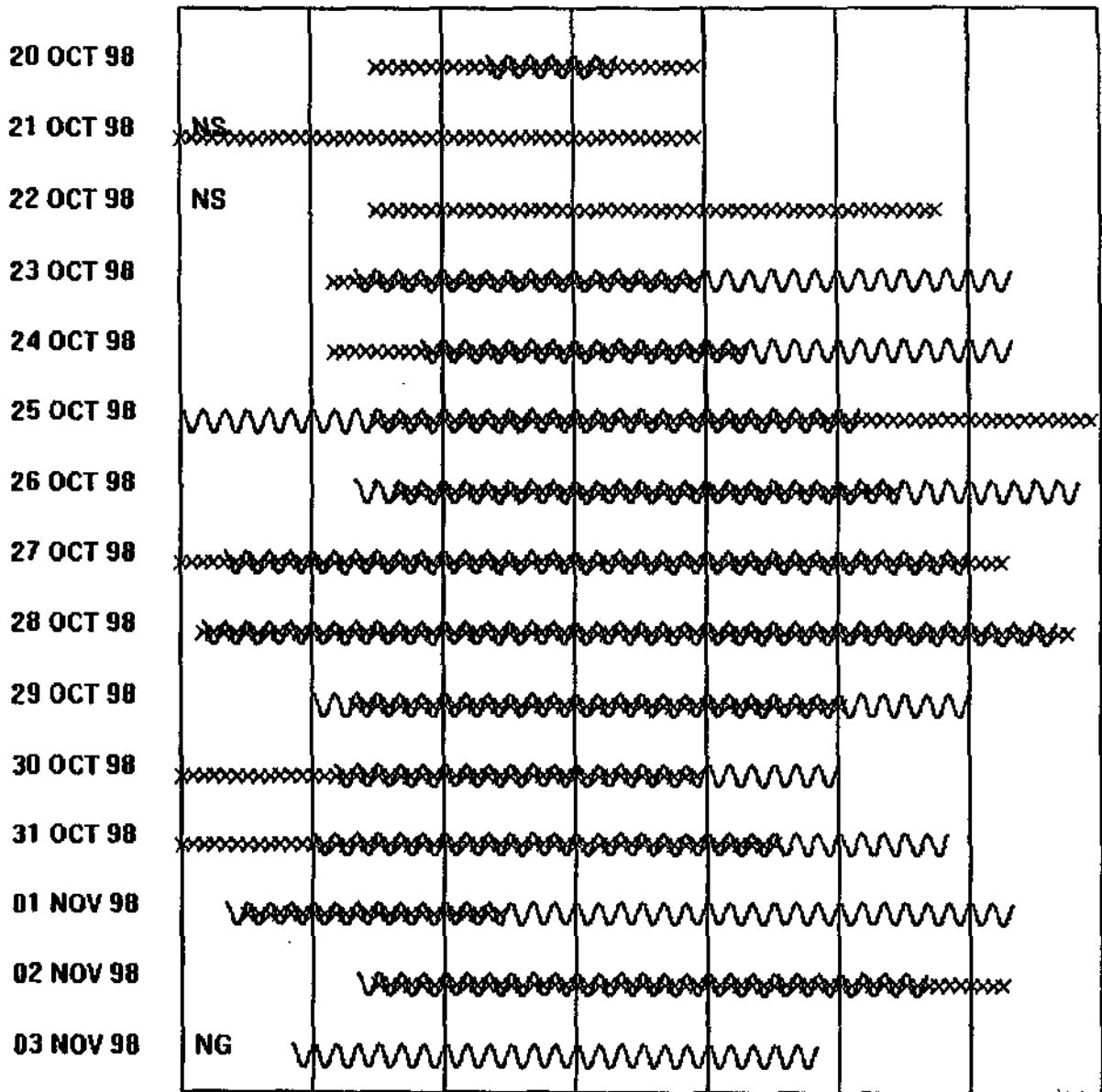
5577 - 01:46 UT

19 20 21 22 23 00 01 02

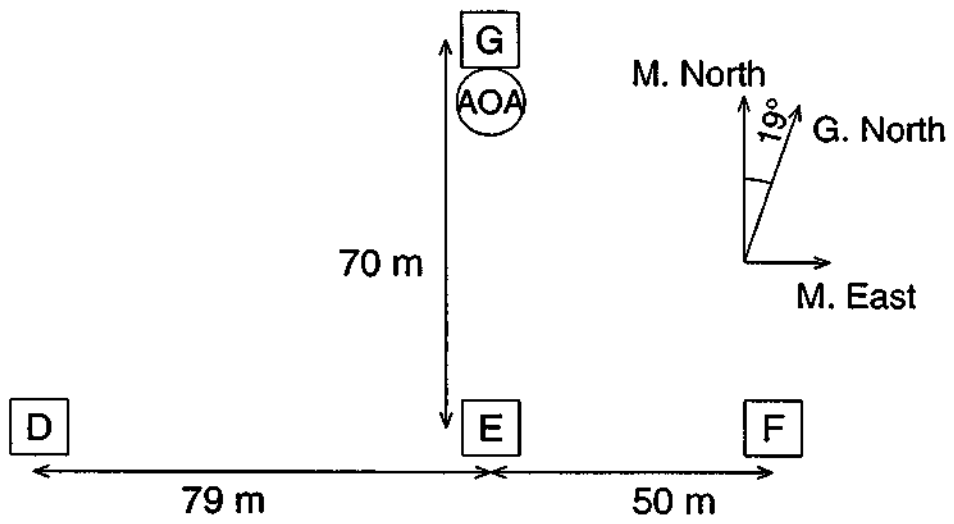


NS = no scintillation  
 NG = no problems with GPS reception  
 ~~~~~ scintillation at INPE  
 xxx no GPS in Petrobrás

19 20 21 22 23 00 01 02

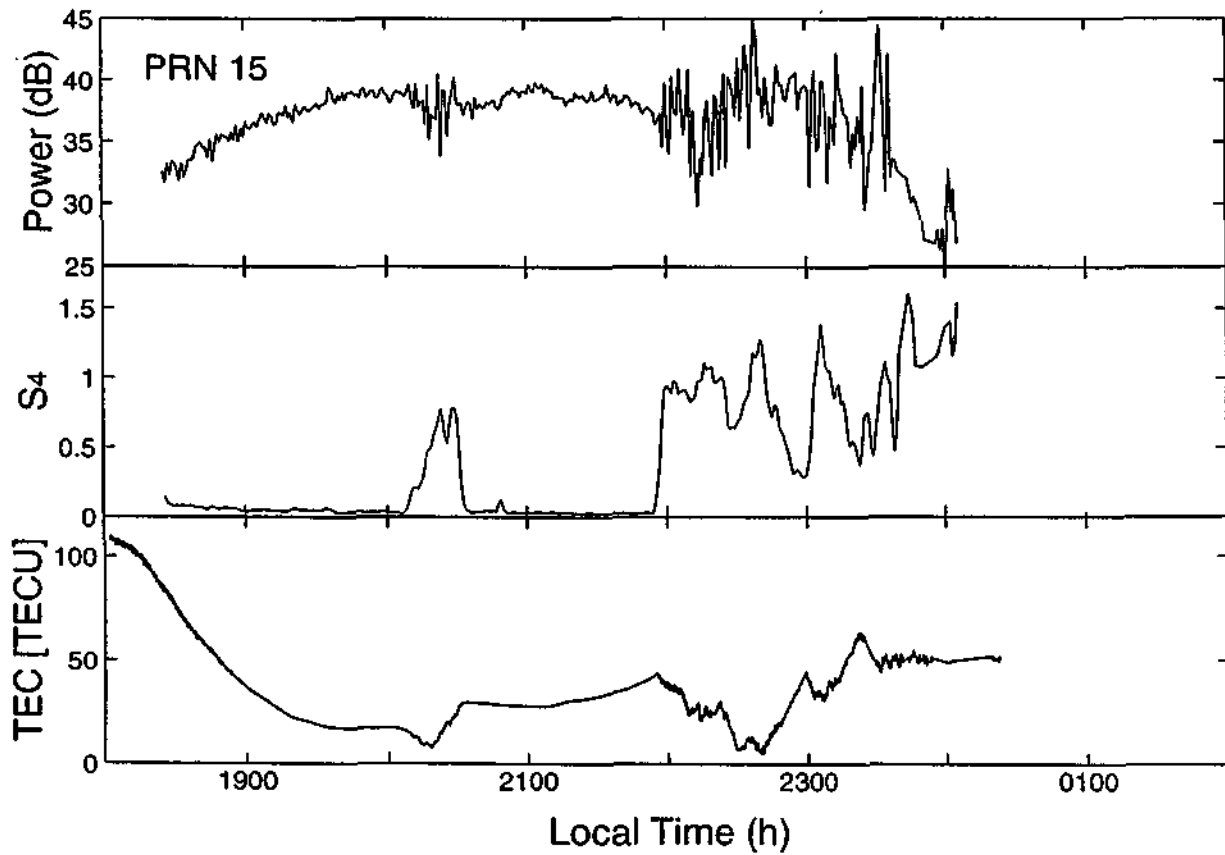
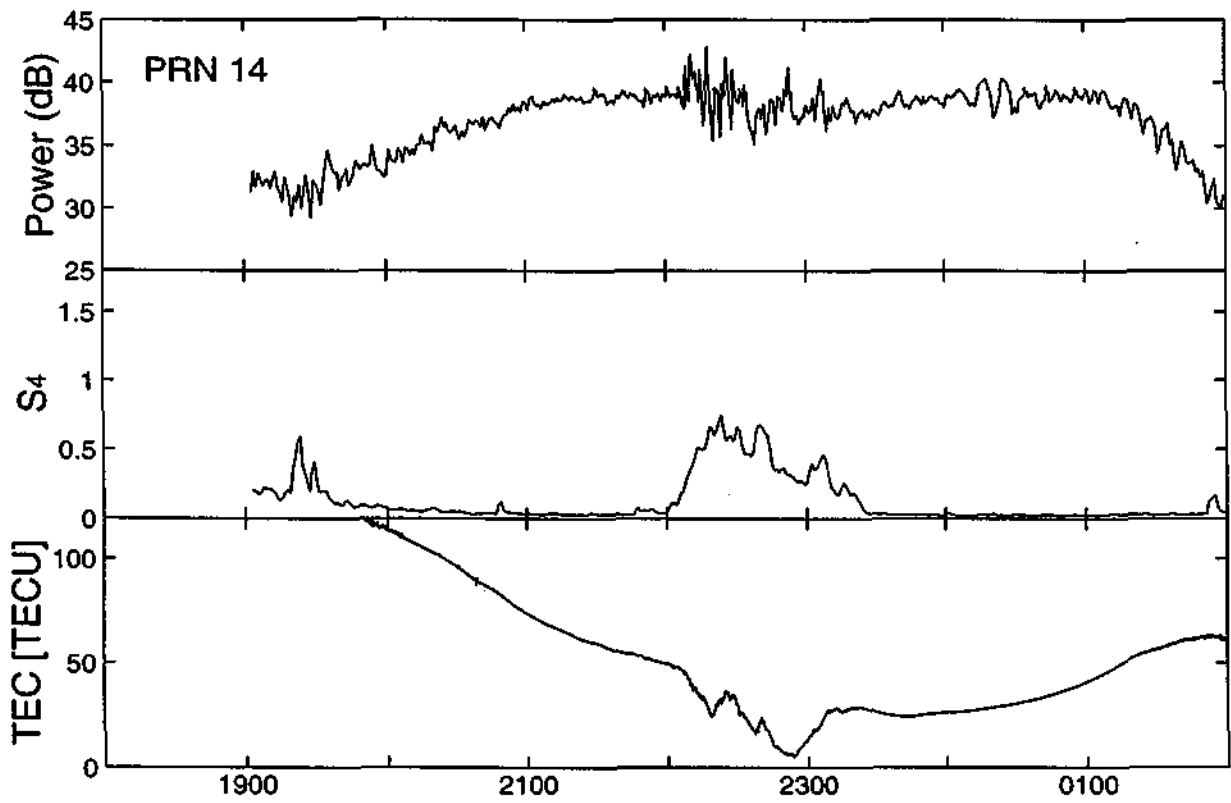


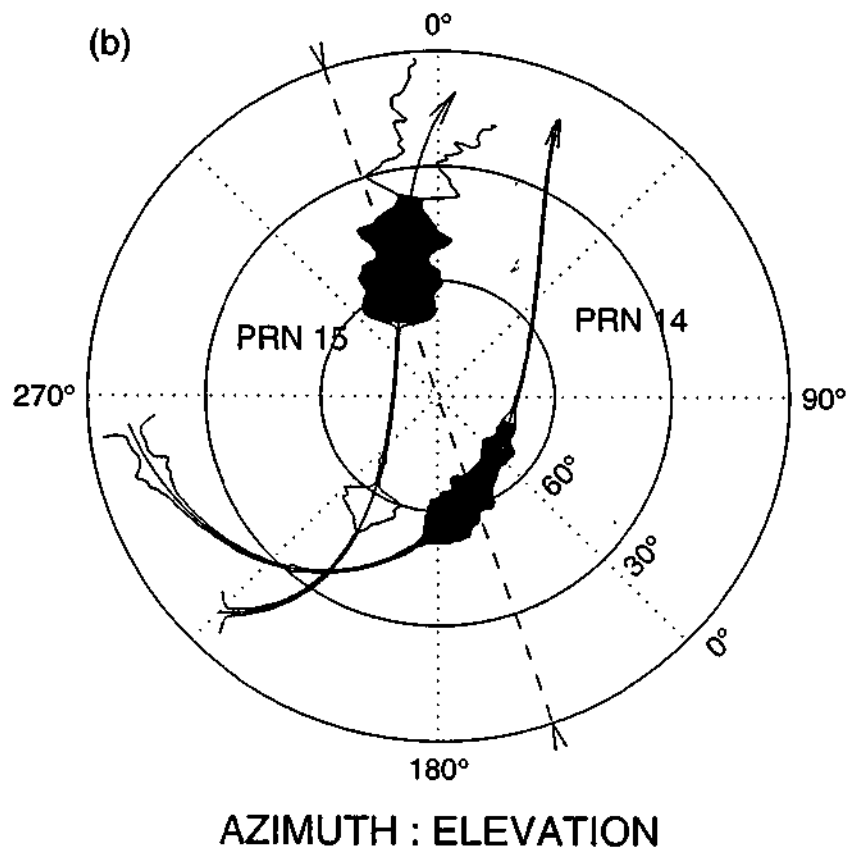
NS = no scintillation  
NG = no problems with GPS reception  
Vx scintillation at INPE  
xxxx no GPS in Petrobrás

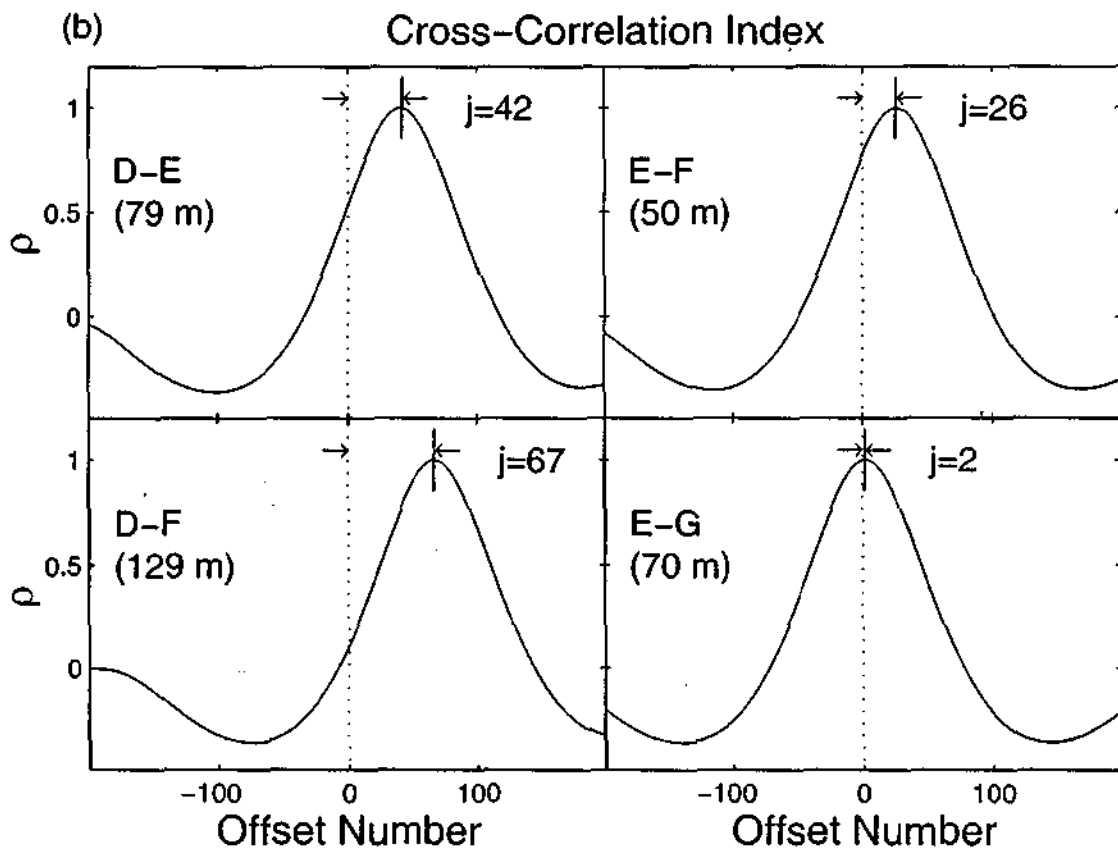
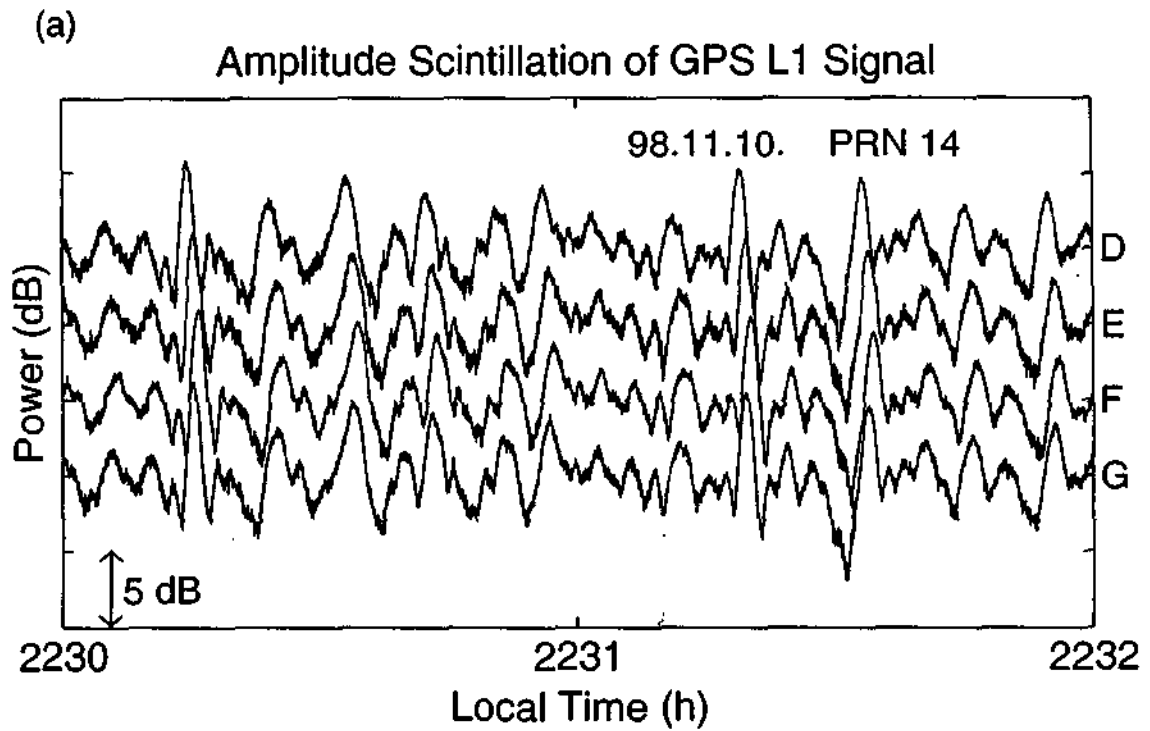


(a)

CACHOEIRA PAULISTA BRAZIL 98.11.10.

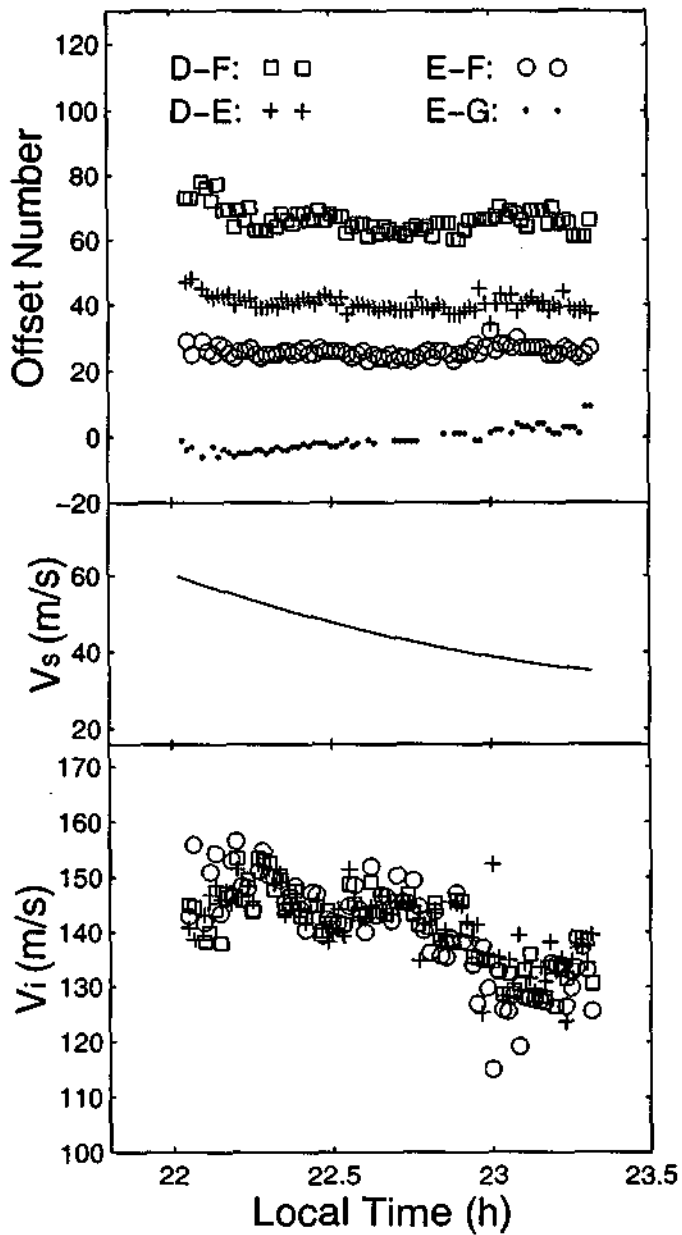




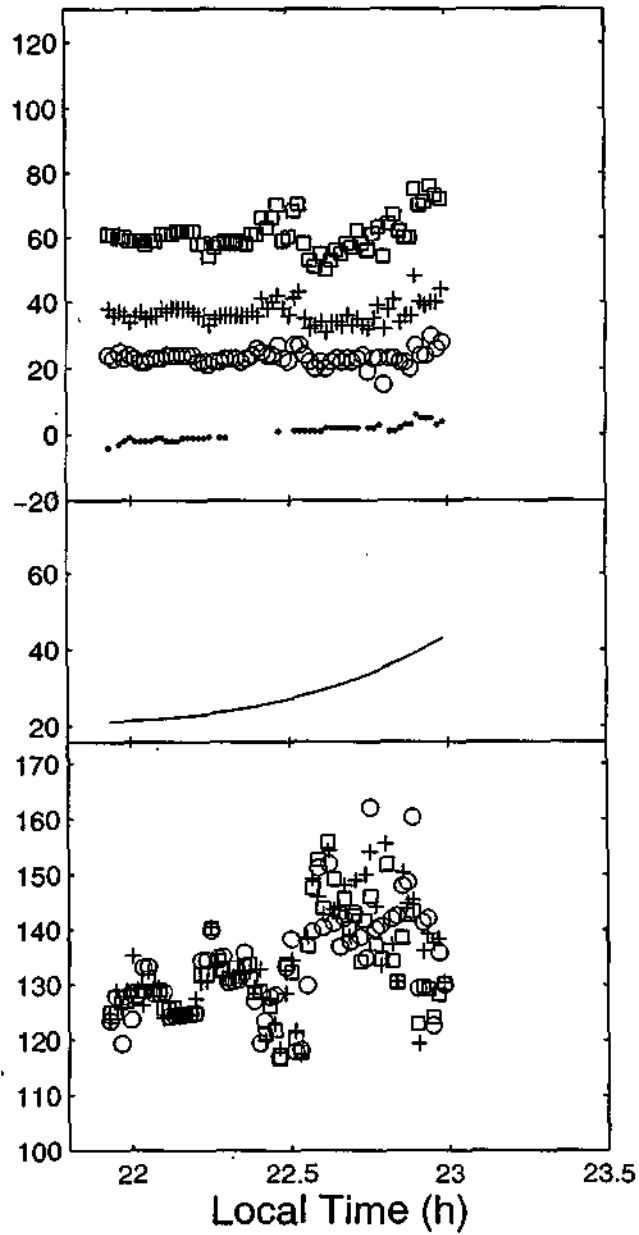




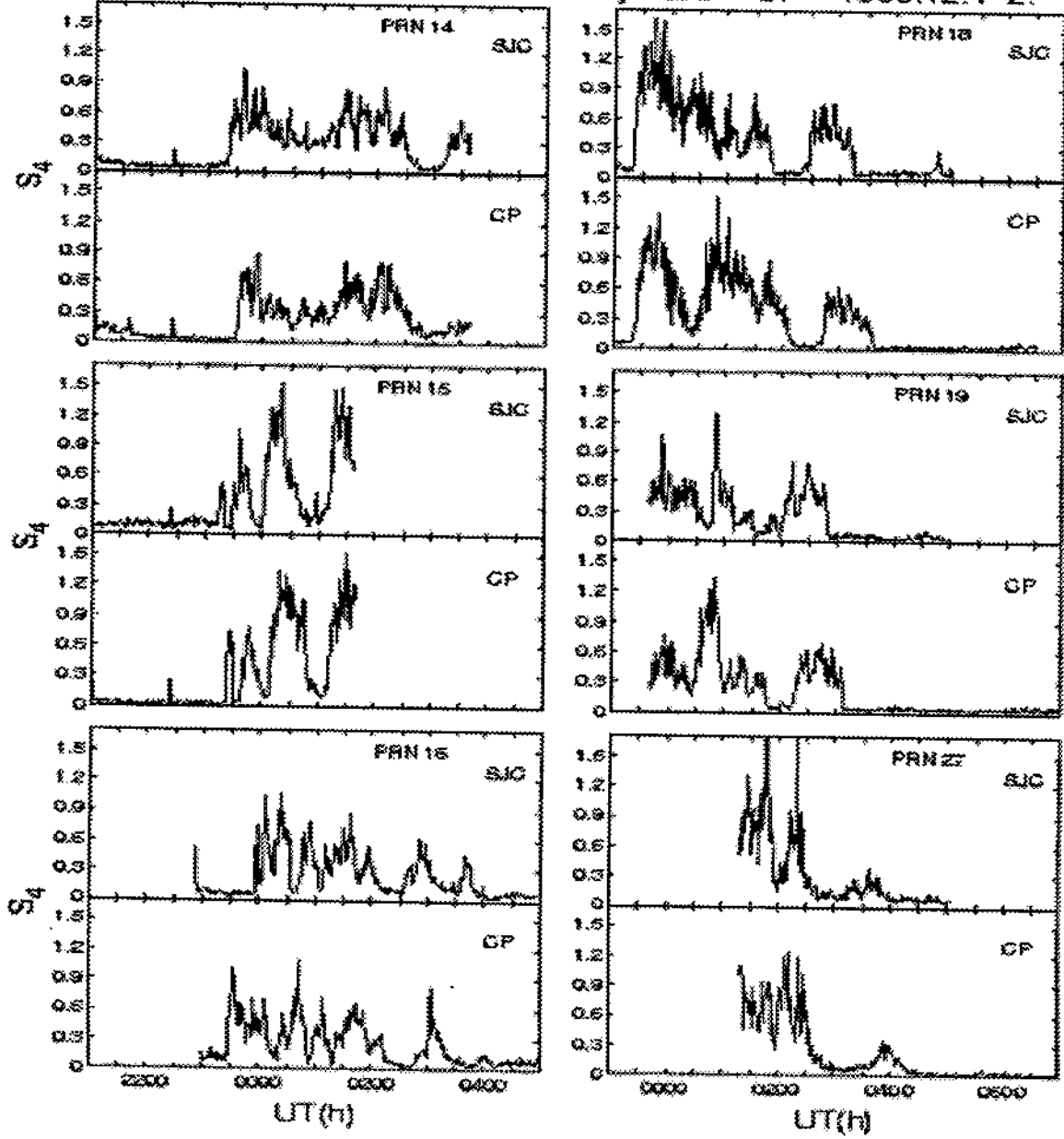
98.11.10. PRN 14



98.11.10. PRN 15



Magnetic East-West Time Delay: SJC - CP 1998.12.1-2.



SJC - CP 98.12.1-18.

