



# INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL – INPE

## CLIMA ESPACIAL; GEOFÍSICA ESPACIAL (PQ031)



### SUA PROVA

- Além deste caderno contendo **5 (cinco)** questões discursivas **com as respectivas folhas de rascunho**, você receberá do fiscal de prova as folhas de textos definitivos;



### TEMPO

- Você dispõe de **4 (quatro) horas** para a realização da prova;
- **2 (duas) horas** após o início da prova, é possível retirar-se da sala, sem levar o caderno de questões;
- A partir dos **30 (trinta) minutos** anteriores ao término da prova é possível retirar-se da sala **levando o caderno de questões**.



### NÃO SERÁ PERMITIDO

- Qualquer tipo de comunicação entre os candidatos durante a aplicação da prova;
- Anotar informações relativas às respostas em qualquer outro meio que não seja no caderno de questões e nas folhas de textos definitivos;
- Levantar da cadeira sem autorização do fiscal de sala;
- Usar o sanitário ao término da prova, após deixar a sala.



### INFORMAÇÕES GERAIS

- Verifique se seu caderno de questões está completo, sem repetição de questões ou falhas. Caso contrário, **notifique imediatamente o fiscal da sala**, para que sejam tomadas as devidas providências;
- Confira seus dados pessoais, especialmente nome, número de inscrição e documento de identidade e leia atentamente as instruções para preencher as folhas de textos definitivos;
- Para o preenchimento das folhas de textos definitivos, use somente caneta esferográfica, fabricada em material transparente, com tinta preta ou azul;
- Assine seu nome apenas no(s) espaço(s) reservado(s) no cartão de respostas;
- Caso você tenha recebido caderno de cargo **diferente** do impresso em suas folhas de textos definitivos, o fiscal deve ser **obrigatoriamente** informado para o devido registro na ata da sala;
- O preenchimento das folhas de textos definitivos é de sua responsabilidade e **não será permitida a troca de folha de texto definitivo em caso de erro cometido pelo candidato**;
- Para fins de avaliação, serão levadas em consideração apenas os textos das folhas de textos definitivos;
- A FGV coletará as impressões digitais dos candidatos na lista de presença;
- Os candidatos serão submetidos ao sistema de detecção de metais quando do ingresso e da saída de sanitários durante a realização das provas.
- **Boa prova!**



### QUESTÃO 1

O efeito mais importante no dínamo ionosférico para latitudes médias é a variação diária do movimento da atmosfera causadas por marés. O sistema de corrente criado por essas marés é chamada *Solar quiet* (Sq).

As correntes Sq formam dois vórtices um mais ao norte e outro mais ao sul que se tocam no Equador magnético, criando o eletrojato equatorial (EEJ).

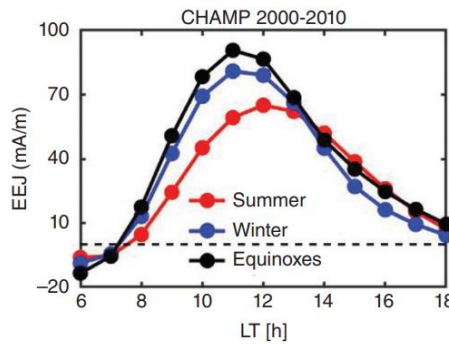
Somente a corrente Sq não pode explicar a intensidade do EEJ.

O objeto desta questão é explorar algumas particularidades do EEJ tais como: mecanismo da amplificação da corrente Sq dando origem ao EEJ, efeitos no EEJ devido a marés solar-lunar, estação do ano, efeito das tempestades magnéticas, variação longitudinal e o CEJ (*Counter ElectroJet*).

**A<sub>1</sub>** Explique por que o campo magnético sobre o Equador magnético é fundamental para o EEJ.

**A<sub>2</sub>** Explique por que as maiores intensidade do EEJ estão concentradas no período das 09-14 horas conforme mostrado na *Figura 1*.

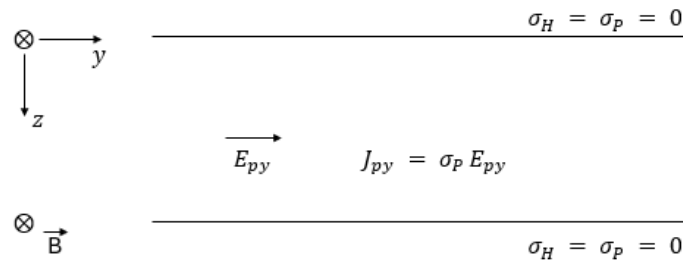
**B)**



**Figura 1** – Variação do EEJ durante o dia. (Ref. The Equatorial Electrojet, H.Luhr, P.Alken and Y.L.Zhou, Ionospheric Dynamics and Applications, pag.281-299, Geophysical Monograph 260, AGU, 2021)

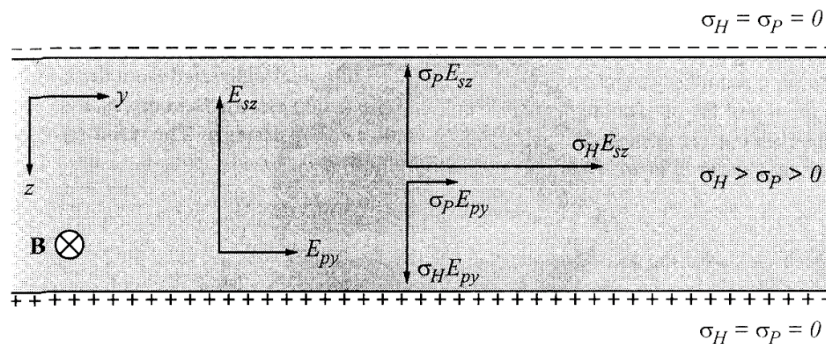
Da *Figura 1* (antes das 8h da manhã) tem-se a disposição mostrada na *Figura 2*, onde o campo magnético está na direção *x* (entrando na página),  $E_{py}$  (*p*, primário) é o campo já pré-existente e  $J_{py} = \sigma_p E_{py}$  é a corrente existente (Sq).

A camada em destaque está limitada na parte superior e inferior por camadas com  $\sigma_H = \sigma_p = 0$  ( $\sigma_H$  condutividade Hall,  $\sigma_p$  condutividade Pedersen).



**Figura 2** – Disposição inicial do sistema físico na ionosfera.

Com o decorrer do dia (09-14 horas) tem-se uma nova disposição de correntes e campos elétricos, mostrada na *Figura 3*.



**Figura 3** – Disposição a ser analisada (*s*, secundário)

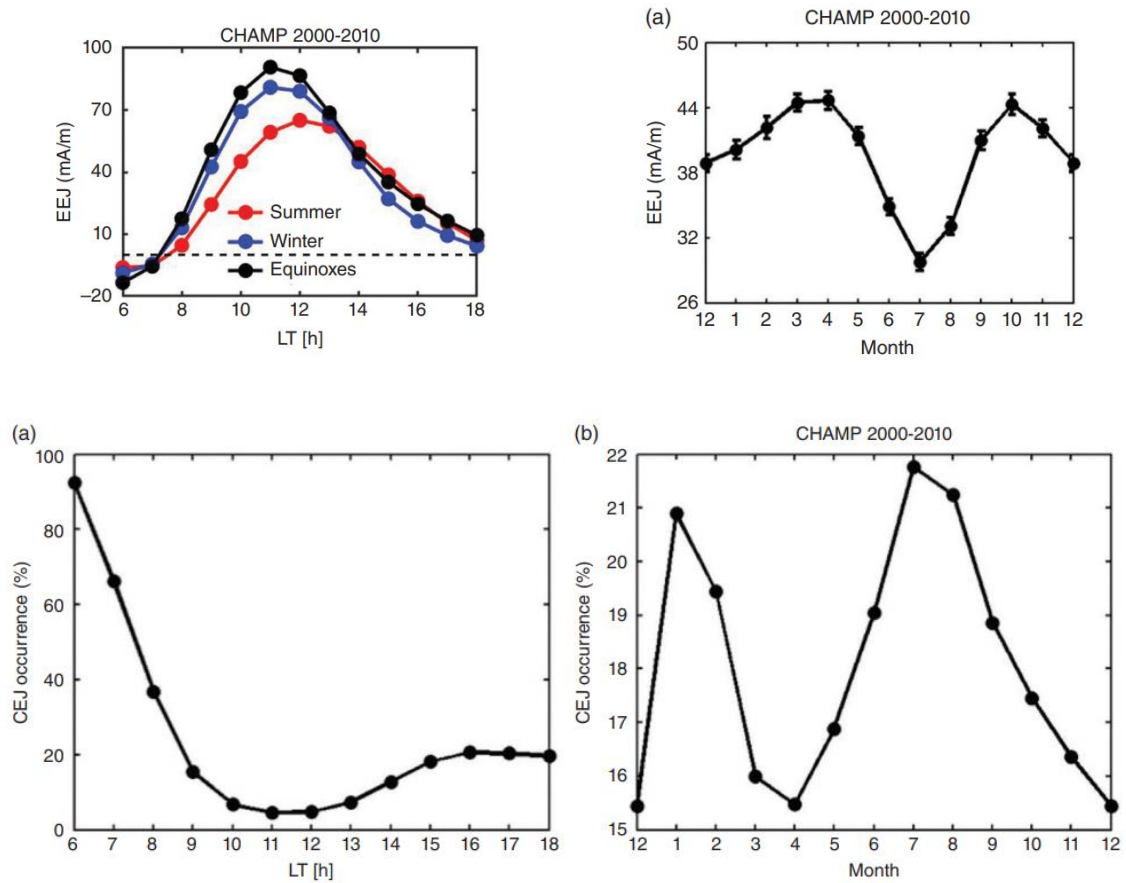
A densidade de corrente perpendicular ao campo magnético é dada por

$$\vec{J}_\perp = \sigma_p \vec{E}_\perp - \sigma_H \frac{(\vec{E} \times \vec{B})}{B}$$

**B<sub>1</sub>** Identifique cada uma das correntes e campos elétricos da *Figura 3* com base em  $\vec{J}_\perp$  e obtenha a relação  $J_y = \sigma_c E_{py}$ , onde  $\sigma_c$  é a condutividade Cowling.

**B<sub>2</sub>** Para  $\sigma_H = (3 \text{ a } 4) \sigma_p$  qual é a amplificação da corrente primária  $J_{py} = \sigma_p E_{py}$  (Sq)?

- C)
- C<sub>1</sub> Discuta os efeitos das marés de origem por ventos solar e lunar no EEJ.
  - C<sub>2</sub> A corrente do EEJ flui normalmente para o leste. mas as vezes inverte o sentido e vai para o oeste. Isto significa que o campo elétrico inverte o sentido daquele mostrado na *Figura 2*. Isto é conhecido como CEJ (*Counter Electrojet*) e pode acontecer por várias causas. Cite pelo menos três delas.
  - C<sub>3</sub> A *Figura 4* mostra a variação durante o dia e os meses do ano para EEJ e CEJ. A variabilidade é decorrente de alguns (e outros) dos fatores citados em C<sub>1</sub> e C<sub>2</sub>. Correlacione os gráficos de EEJ e CEJ.
  - C<sub>4</sub> Explique o motivo da ocorrência do CEJ principalmente de manhã e no fim da tarde.



**Figura 4** – Comparativo da variabilidade diária e anual entre EEJ e CEJ. (Ref. The Equatorial Electrojet, H.Luhr, P.Alken and Y.L.Zhou, Ionospheric Dynamics and Applications, pag.281-299, Geophysical Monograph 260, AGU, 2021)

1  
-----  
2  
-----  
3  
-----  
4  
-----  
5  
-----  
6  
-----  
7  
-----  
8  
-----  
9  
-----  
10  
-----  
11  
-----  
12  
-----  
13  
-----  
14  
-----  
15  
-----  
16  
-----  
17  
-----  
18  
-----  
19  
-----  
20  
-----  
21  
-----  
22  
-----  
23  
-----  
24  
-----  
25  
-----  
26  
-----  
27  
-----  
28  
-----  
29  
-----  
30  
-----  
31  
-----  
32  
-----  
33  
-----  
34  
-----  
35  
-----

36

---

37

---

38

---

39

---

40

---

41

---

42

---

43

---

44

---

45

---

46

---

47

---

48

---

49

---

50

---

51

---

52

---

53

---

54

---

55

---

56

---

57

---

58

---

59

---

60

---

## QUESTÃO 2

---

A ionosfera de baixas latitudes e região equatorial é fortemente afetada por campos elétricos gerados pelos dínamos dos ventos termosféricos e do vento solar-magnetosfera. Em condições geomagnéticas quietas, os campos elétricos, e as resultantes velocidades de deriva, exibem variações sistemáticas com a hora local e são responsáveis pela geração de fortes irregularidades do plasma desde a camada E a F por meio de instabilidades.

Durante tempestades geomagnéticas e alguns dias depois, esses campos elétricos e as resultantes velocidades de deriva são significativamente perturbados por campos elétricos gerados pelo dínamo vento solar-magnetosfera. As mais fortes e rápidas perturbações, que resultam de variações rápidas de vários parâmetros do vento solar, magnetosfera e ionosfera, são normalmente chamadas campos de penetração imediata (*prompt penetration electric fields*).

A deposição de energia e momento nas altas latitudes ionosféricas durante tempestades geomagnéticas gera um outro campo de perturbação que também afeta a ionosfera de baixas latitudes. Em condições geomagnéticas quietas e perturbadas, a densidade eletrônica da ionosfera de baixas latitudes exibe uma grande variedade de perturbações caracterizadas por amplas escalas temporais e espaciais e com forte dependência da hora local e atividade magnética que são frequentemente referidas como irregularidades de plasma. Estas irregularidades podem afetar significativamente as operações de sistemas de comunicação e navegação de satélites através das chamadas cintilações.

- A) Descreva, em função da hora local, as variações das intensidades (com seus valores médios e máximos) dos campos elétricos verticais e zonais no electrojato equatorial para condições de equinócio, fluxo solar médio e baixa atividade geomagnética.
- B) Descreva as instabilidades de plasma que geram fortes irregularidades de plasma no electrojato equatorial e as condições para suas ocorrências.
- C) Descreva os parâmetros e processos mais importantes do vento solar, magnetosfera e da alta latitude ionosférica que afetam a geração de campos elétricos de penetração.
- C) Descreva os índices ou parâmetros geomagnéticos da magnetosfera e ionosfera, incluindo o que representam e resoluções temporais, frequentemente usados em estudos de efeitos ionosféricos causados por campos elétricos equatoriais de penetração.
- D) Qual e a razão típica entre as intensidades do campo elétrico zonal do vento solar e a correspondente de penetração no equador durante o dia. Em que caso o campo elétrico zonal do vento solar diminui a corrente diurna do electrojato equatorial.
- E) Descreva a variação com tempo local das velocidades verticais de perturbação no equador, com os tempos de seus valores máximos, devido a deposição de grande quantidade de energia e momento durante tempestades geomagnéticas.
- F) Descreva, em função da hora local, os efeitos dos campos de perturbação imediata e resultante de energia depositada em altas latitudes na geração e amortecimento (*damping*) de irregularidades de plasma na camada F equatorial.
- G) Descreva os processos responsáveis pela ocorrência de cintilações nos sinais de satélites recebidos em terra, a variação de suas intensidades com o fluxo solar, e as escalas de tamanho das irregularidades responsáveis para cintilações nos sinais de frequência dos satélites do sistema GPS.

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35



36

---

37

---

38

---

39

---

40

---

41

---

42

---

43

---

44

---

45

---

46

---

47

---

48

---

49

---

50

---

51

---

52

---

53

---

54

---

55

---

56

---

57

---

58

---

59

---

60

---

### QUESTÃO 3

---

A) Partículas carregadas no cinturão de radiação interno da Terra derivam longitudinalmente no plano equatorial, aprisionadas nas linhas de campo geomagnéticas em trajetórias helicoidais devido às forças de Lorentz. À medida em que se aproximam da Terra a intensidade do campo magnético aumenta e a componente da velocidade paralela ao campo diminui e eventualmente se anula e muda de direção. As partículas aprisionadas ficam então num movimento oscilatório sendo refletidas nos hemisférios norte e sul.

**Explique porque essas reflexões ocorrem.**

B) Na região da *Anomalia Magnética do Atlântico* (ou América) do Sul (AMAS) a intensidade do campo geomagnético atinge seu mínimo e as altitudes dos pontos de reflexão diminuem chegando a ~ 100km (na camada E ionosférica). Nessas altitudes as partículas perdem energia através de processos de ionização, aumentando a condutividade da camada.

**Explique porque a camada E ionosférica é chamada de região de dínamo atmosférico.**

C) Entre os diversos processos eletrodinâmicos na ionosfera equatorial tem fundamental importância o estudo das bolhas de plasma, que são regiões de baixa densidade de plasma, que se formam na borda inferior da camada F da ionosfera e derivam verticalmente para cima. Elas são causadas por uma combinação de força gravitacional, campos elétricos e ventos neutros induzindo a instabilidade de Raleigh-Taylor. A instabilidade de Raleigh-Taylor é favorecida pela subida da camada F (deriva vertical) que causa um aumento do gradiente de densidade na sua borda inferior.

**Explique como na região da AMAS a precipitação de partículas na camada E da ionosfera, mesmo em períodos não perturbados, favorece o aparecimento de bolhas de plasma no terminador solar.**

D) Na ionosfera equatorial, durante períodos noturnos não perturbados, bolhas de plasma derivam para leste juntamente com o plasma ambiente. Foi observado em várias ocasiões na ionosfera brasileira que durante tempestades magnéticas essas derivas podem ser alteradas pelos campos elétricos de penetração (PPEF – *Prompt Penetration Electric Fields*) que apontam para leste (*undershielding*), podendo até reverter a deriva zonal para oeste. Nestas ocasiões também foi observado o aparecimento de camadas E esporádicas sugerindo que houve a precipitação de partículas na AMAS, aumentando a condutividade Hall da camada E.

**Esquematize e descreva o processo eletrodinâmico que explicaria como campos elétricos de penetração (PPEF) apontados para leste na camada E, podem produzir perturbações para oeste na deriva zonal da camada F durante o período noturno.**

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36

---

37

---

38

---

39

---

40

---

41

---

42

---

43

---

44

---

45

---

46

---

47

---

48

---

49

---

50

---

51

---

52

---

53

---

54

---

55

---

56

---

57

---

58

---

59

---

60

---

## QUESTÃO 4

---

Erupções solares, Ejeções de Massa Coronal (CME) e tempestades geomagnéticas são fenômenos fontes importantes da variabilidade do Clima Espacial, que produzem efeitos significativos na atmosfera terrestre, e, em particular, na ionosfera. Por sua vez, esses efeitos podem impactar sistemas tecnológicos e infraestrutura, tanto no espaço como na superfície da Terra.

A mitigação desses impactos necessita do conhecimento das características dos eventos de Clima Espacial assim como dos efeitos por eles produzidos na ionosfera.

**Sobre o tema, responda aos itens a seguir.**

**A) Descreva erupções solares, Ejeções de Massa Coronal (CME) e tempestades geomagnéticas.**

*Obs.: as respostas deverão incluir valores típicos, como a faixa de energia que é liberada durante uma erupção solar, a faixa de velocidades dos CMEs, o significado da geofetividade dos CMEs, e a classificação da importância das tempestades geomagnéticas.*

**B) Cite e analise os efeitos na ionosfera terrestre em todas as latitudes que esses três fenômenos do Clima Espacial podem produzir.**

*Obs.: A análise deve incluir os efeitos do ponto de vista físico e as consequências associadas em sistemas tecnológicos e/ou infraestrutura.*

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36  
-----  
37  
-----  
38  
-----  
39  
-----  
40  
-----  
41  
-----  
42  
-----  
43  
-----  
44  
-----  
45  
-----  
46  
-----  
47  
-----  
48  
-----  
49  
-----  
50  
-----  
51  
-----  
52  
-----  
53  
-----  
54  
-----  
55  
-----  
56  
-----  
57  
-----  
58  
-----  
59  
-----  
60  
-----

## QUESTÃO 5

---

Considere o texto,

*Depois de 3 anos de trabalho, foi publicada a versão final do Plano Global 2015-2025 para Proteger a Sociedade dos Efeitos do Clima Espacial (com título em inglês: Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by Committee on Space Research and International Living With a Star Program, um trabalho que envolveu 27 cientistas de 15 países. O artigo, em inglês, está disponível online no sítio da Revista Advances in Space Research, publicado na Europa.*

*O representante do Brasil neste trabalho afirmou que foi uma tarefa extremamente desafiadora, pois é sabido que os problemas do clima espacial afetam de maneira diferente cada país, devido às suas posições geográficas no globo terrestre, portanto, as experiências de cada um dos cientistas eram focadas em aspectos distintos. Contudo, o grupo foi capaz de utilizar estas divergentes visões para compor um trabalho completo que cobre os mais diferentes fenômenos associados aos efeitos do clima espacial nos setores econômicos de cada nação. Adicionalmente, a experiência diversificada, permitiu que quase todos os “buracos” no conhecimento fossem apontados. “Agora a bola está com os governos e com as agências de fomento para destinarem recursos adicionais às pesquisas que necessitam ser feitas nesta área para, de fato, proteger a sociedade”, afirmou o representante brasileiro.*

(Fonte: <https://www2.inpe.br/climaespacial/portal/plano-global-para-proteger-a-sociedade-dos-efeitos-do-clima-espacial/> (modificado, 04/05/2015))

Com base no texto, responda aos itens a seguir.

- A) Defina o que se convencionou chamar de clima espacial: o que é e o que o modifica.**
- B) Como o clima espacial se relaciona com a alta atmosfera terrestre?**
- C) Sobre os assim chamados produtos e serviços de clima espacial:**
- C<sub>1</sub> o que são?**
  - C<sub>2</sub> cite alguns, tanto internacionais como nacionais, e exemplifique seus usos, no contexto científico e tecnológico.**
  - C<sub>3</sub> explique a importância desses produtos para a sociedade moderna, altamente dependente de tecnologia, especialmente a aeroespacial.**
  - C<sub>4</sub> cite aplicações espaciais e aeronáuticas e em outras infraestruturas críticas para a humanidade.**



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36

---

37

---

38

---

39

---

40

---

41

---

42

---

43

---

44

---

45

---

46

---

47

---

48

---

49

---

50

---

51

---

52

---

53

---

54

---

55

---

56

---

57

---

58

---

59

---

60

---

Realização

