



# INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL – INPE

## MODELAGEM NUMÉRICA DO SISTEMA TERRESTRE COM ÊNFASE EM ASSIMILAÇÃO DE DADOS (PQ022)



### 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

---

Considere o teorema de Bayes e as seguintes funções densidades de probabilidades (FDPs):  $p(x_b|x)$ ,  $p(y|x)$ ,  $p(y)$  e  $p(x|y)$ , sendo, respectivamente, a probabilidade do estado  $x$  antes das novas observações, a probabilidade das observações  $y$  condicionadas ao estado, probabilidade marginal das observações e a probabilidade do estado atualizado após a análise.

Sobre o tema, responda aos itens a seguir.

- A) Desenvolva a expressão para a função custo do método 3D-Var ao considerar distribuições Gaussianas para as FDPs.
- B) Descreva qual seria a principal diferença no *item a* se fosse o método 4D-Var. Qual é a principal dificuldade prática no desenvolvimento e na manutenção de um sistema de assimilação 4D-Var? Qual é sua principal vantagem com relação ao 3D-Var?
- C) Atualmente, qual é o método que os grandes centros mundiais de meteorologia estão adotando, operacionalmente, para minimizar as dificuldades do 4D-Var e, ainda, adicionar vantagens sobre métodos por conjuntos baseados em Filtros de Kalman? Explique sua resposta.

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

---

No início da assimilação de dados, a quantidade de observações disponíveis para este fim era extremamente limitada. Basicamente existiam dados convencionais e em horários sinóticos. O primeiro método estatístico de maior sucesso a ser executado em diversos centros operacionais foi a Interpolação Ótima (IO), mas com o avanço do sistema de observação, esse método de assimilação foi abandonado em detrimento aos variacionais, inicialmente substituído pelo 3D-Var.

Sobre o tema, responda aos itens a seguir.

- A) Por que a IO foi abandonada com o avanço do sistema de observação?
- B) Por que dados convencionais, especialmente radiossondagem e boias, ainda são extremamente úteis nos sistemas de assimilação de dados apesar de serem poucas comparadas com dados provenientes de satélites?
- C) Qual é a dificuldade, do ponto de vista do operador observação, quando assimilamos dados de radiâncias?
- D) Explique qual é o propósito de aplicar métricas como FSOI (do inglês, *Forecast Sensitivity Observation Impact*) e OSE (do inglês, *Observing System Experiment*) e como estudos com estas métricas nos grandes centros meteorológicos globais podem afetar o sistema de observação futuro.

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 previsão de fenômenos atmosféricos por meio de modelos numéricos em suas diferentes escalas é um problema de alta dimensão. Portanto, faz-se necessário aplicar técnicas de redução de dimensionalidade e outras técnicas de pré-processamento nos dados de entrada de uma rede neural, tal como normalização.

No contexto de assimilação de dados por Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*), o estado da arte são redes convolucionais, profundas e recorrentes. Nestas redes, é usual o aprendizado supervisionado com algoritmo de retropropagação do erro em alguma de suas camadas.

- A) Explique as técnicas de pré-processamento que podem/devem ser aplicadas no conjunto de treinamento de uma Rede Neural Artificial (RNA).
- B) Qual o argumento para se utilizar uma rede neural artificial supervisionada, no contexto de assimilação de dados, haja vista que a rede supervisionada exige, concomitantemente, a utilização de outra técnica, seja variacional ou sequencial?
- C) Explique por qual razão a função de ativação deve ser contínua ou contínua por partes, ao se utilizar a retropropagação por erro (*backpropagation*) no treinamento de uma rede neural.
- D) Discorra sobre redes neurais convolucionais, profundas e recorrentes.

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

---

O *Ensemble Kalman Filter* (EnKF) e suas variantes são métodos de assimilação de dados e previsão estatística populares em Geofísica por se adequarem a sistemas moderadamente não-lineares de dimensão moderadamente alta.

Pede-se:

**A<sub>1</sub>** Por que tais métodos se aplicam a sistemas moderadamente não-lineares de dimensão moderadamente alta?

**A<sub>2</sub>** O que é a etapa de *Tapering* (ou *localization*) em tais métodos? Para que serve e como é feito.

**A<sub>3</sub>** O que é a etapa de *Boosting* (ou *inflation*) em tais métodos? Para que serve e como é feito.

**A<sub>4</sub>** Por que tais etapas são indispensáveis ao EnKF e suas variantes?

**B<sub>1</sub>** Como, no âmbito do EnKF, se compensa o erro devido a truncamento do modelo usando *Inflation*?

**B<sub>2</sub>** Quais os prós e os contras de se usar *Inflation* para este fim?

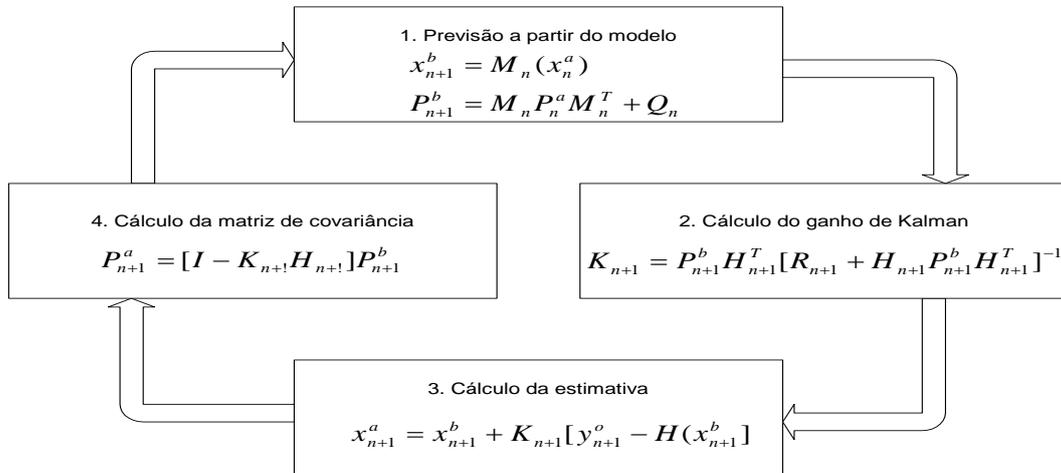


36  
-----  
37  
-----  
38  
-----  
39  
-----  
40  
-----  
41  
-----  
42  
-----  
43  
-----  
44  
-----  
45  
-----  
46  
-----  
47  
-----  
48  
-----  
49  
-----  
50  
-----  
51  
-----  
52  
-----  
53  
-----  
54  
-----  
55  
-----  
56  
-----  
57  
-----  
58  
-----  
59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

## QUESTÃO 5

Assimilação de Dados pode ser entendida como um problema inverso dentro de uma teoria mais ampla, conhecida como Teoria de Estimação. O Filtro de Kalman, técnica utilizada em engenharia, astronomia e outras áreas, têm sido amplamente utilizada na Assimilação de Dados aplicada à Meteorologia.

A figura a seguir, contém as equações de Filtro de Kalman.



- Explique como o Filtro de Kalman é utilizado na construção da condição inicial de modelos de previsão Numérica de Tempo (explicar as equações e a sequência dos cálculos).
- Destaque as equações que, na prática, não são calculadas conforme a formulação teórica acima, como a Matrix de Covariância dos Erros de Previsão.
- Destaque importantes aproximações utilizadas na derivação do Filtro de Kalman.

- 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

