

Estudo de sensibilidade das previsões de superfície em Portugal pelo WRF face à variação das parametrizações físicas

A. P. Ferreira⁽¹⁾, J. M. Castanheira⁽²⁾, A. Rocha⁽³⁾, J. Ferreira⁽⁴⁾

Departamento de Física da Universidade de Aveiro
Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

⁽¹⁾ pauloferreira@sapo.pt ⁽²⁾ jcast@ua.pt ⁽³⁾ alfredo.rocha@ua.pt ⁽⁴⁾ juan@ua.pt

SUMMARY

An experiment with WRF atmospheric modeling system (ARW-v2.2) was undergone aiming to test the effect of several physics parameterizations in surface wind, temperature and water vapor mixing ratio simulations. Based on point to point validation, our work has been focused on 7 weather stations over Portugal with observations taken from 4 days of unstable atmospheric conditions for each month of 2006. The sensitivity study comprised 24 combinations of the schemes for microphysics, short-wave radiation, planetary boundary layer, surface layer and cumulus parameterization. The corresponding mean and root mean square errors were evaluated for each quarter as functions of the forecasting time up to 48 h. Results are demonstrative of a strong influence of daylight and season both in error magnitudes and their differences, and of the interaction between different processes. Nevertheless, we found that the surface layer scheme along with planetary boundary layer scheme plays a major role in the skill of the surface wind speed forecasts during the cold seasons at all times of the day.

1 Introdução

O WRF (*Weather Research and Forecast*) é um sistema de modelação numérica orientado para a pesquisa dos fenómenos atmosféricos e a previsão do tempo em mesoescala. O seu desenvolvimento contínuo é fruto da colaboração entre vários centros de investigação e agências governamentais dos EUA. Concebido para ser uma ferramenta flexível, portátil e eficiente em diversas plataformas de computação, o WRF usa *software* livre em domínio público (<http://wrf-model.org/users/users.php>). Os esforços de validação deste modelo centram-se no ensaio das possibilidades oferecidas pelo vasto leque de opções incluídas: vários esquemas para cada processo físico, diferentes opções na formulação dinâmica, inúmeras alternativas nos próprios métodos numéricos. Essa polivalência do modelo traduz bem a ideia de pesquisa e experimentação contínua que está subjacente à sua criação.

A validação de um modelo atmosférico numérico pode ser vista segundo vários ângulos (Pielke, Sr., 2002), que se complementam: 1) comparação de resultados do modelo com soluções conhecidas dum modelo analítico análogo; 2) verificação dos balanços que exprimem a conservação de massa e de energia; 3) comparação com resultados de modelos numéricos diferentes na concepção; 4) comparação entre resultados de formulações alternativas do mesmo modelo; 5) comparação das previsões do modelo com as observações. Neste contexto, os *estudos* (ou *testes*) de *sensibilidade* referem-se ao 4º item, ou ao 4º combinado com o 5º. O princípio é o

de comparar entre si, ou testar um a um contra as observações, os resultados dum modelo quando se faz variar uma parte do mesmo: um algoritmo numérico, uma equação, uma constante de uma parametrização, ou mesmo a troca de um esquema de parametrização por outro. Obter resultados (quase) iguais com diferentes formulações do modelo não garante a sua validade no sentido da capacidade de realizar previsões acertadas; se, pelo contrário, forem grandes as diferenças entre os resultados, não poderão estar todos certos por igual. A avaliação da prestação frente às observações é a etapa decisiva de validação. O sistema de modelação WRF, para cuja elaboração concorreram muitos especialistas e a experiência acumulada de modelos anteriores, percorreu as etapas fundamentais de validação enunciadas. O seu desempenho contra as observações foi comparado com outros modelos operacionais (vg., RUC, meso-Eta), ao ponto de se ter tornado operacional na previsão do tempo com uma resolução de malha horizontal ~10 km. Contudo, prosseguem os estudos de verificação do desempenho em situações meteorológicas concretas, incluindo a comparação das opções disponíveis para os esquemas físicos. De tais estudos espera-se o aperfeiçoamento do modelo, seja pelo melhoramento dos seus componentes, seja pela selecção das variantes dos mesmos com o fim de descobrir quais são as combinações óptimas para determinados fenómenos.

Certos mecanismos atmosféricos (como a formação

de nuvens, a precipitação, as trocas radiativas), não são do âmbito da dinâmica de fluidos; outros (como as trocas turbulentas), por serem de estrutura muito fina, não podem, na prática, ser representados pelas leis hidrodinâmicas na sua forma fundamental. Tradicionalmente, os primeiros são objecto da Meteorologia Física; os segundos tendem a ser incluídos nesse ramo da Física da Atmosfera, na medida em que requerem a analogia a leis que procedem da descontinuidade da matéria (vg., viscosidade). Daí vem a designação de processos físicos. Não podendo ser resolvidas pelas equações dum modelo dinâmico numérico, discretas nos pontos de uma grelha do espaço e do tempo, diz-se que são de sub-grelha. As parametrizações são modelos específicos que relacionam os processos de sub-grelha com as variáveis de prognóstico que entram nas equações dinâmicas. O seu acoplamento ao modelo dinâmico traduz-se em esquemas de cálculo que estimam o efeito dum certo processo de sub-grelha sobre as variáveis resolvidas em primeira instância pelas equações dinâmicas. Embora um modelo numérico atmosférico se alicerce no seu *core* dinâmico, as parametrizações estão na linha da frente quando se trata de simular os fenómenos do tempo com realismo.

Os testes de sensibilidade por nós desenvolvidos consistiram em variar certas opções dos esquemas físicos do WRF-ARWv2.2, comparando as previsões resultantes com um conjunto de observações locais de algumas variáveis atmosféricas de superfície. Esse estudo reporta-se a 48 dias repartidos pelo ano de 2006, e a um domínio geográfico focado em Portugal, com simulações estendidas à Península Ibérica. Testar a sensibilidade a parametrizações variadas dum mesmo processo não é trivial, por nem sempre se poder tirar conclusões gerais acerca do efeito da modificação testada; qualquer nova realização do modelo que inclua ainda a variação de uma parametrização de natureza fisicamente diversa pode alterar os resultados do primeiro teste. Tal é consequência da interacção entre os processos físicos, com mecanismos de realimentação cujos efeitos são impossíveis de prever analiticamente. A necessidade de impôr condições de fronteira lateral a partir de um modelo de escala maior, um aspecto peculiar dos modelos de área limitada, levanta o problema da sensibilidade à área do domínio e a outros aspectos do acoplamento entre modelos de diferente escala, como a resolução das respectivas malhas. No trabalho aqui documentado, avaliou-se a sensibilidade à variação dos esquemas físicos, fixando tudo o mais, no pressuposto de que os processos físicos assumem particular protagonismo junto à superfície. A escolha entre várias opções de diferentes processos dificulta a tarefa de eleger um subconjunto do universo das combinações possíveis. Em estudos dirigidos a fenómenos particulares é natural que se teste apenas um tipo de esquema

físico; vg., dois ou mais esquemas de microfísica para ver qual deles apresenta melhor desempenho na previsão da precipitação em situações de tempo severo. No caso, pretendia-se avaliar o desempenho de diferentes realizações do modelo na previsão de alguns parâmetros atmosféricos de superfície em condições de tempo irregular: a temperatura, o vento e a razão de mistura de vapor de água. Atendendo às interacções entre os processos físicos envolvidos, é difícil prever, caso a caso, se algum será dominante sobre os restantes. No plano da experimentação, interessava, pois, ensaiar um número razoável de combinações, compatível com o tempo disponível para levar a cabo as corridas do modelo e o processamento dos *outputs*.

2 Modelo WRF-ARW

O sistema de modelação WRF alberga dois *cores* dinâmicos: ARW (*Advanced Research WRF*) e NMM (*Nonhydrostatic Mesoscale Model*). O NMM é um modelo não hidrostático desenvolvido pelos NCEP a partir do modelo operacional hidrostático ETA; o ARW, à semelhança do MM5, tira partido do esquema de divisão do incremento de integração para as ondas acústicas e gravíticas oriundo do modelo de nuvens de Klemp-Willhelmson. Os dois *cores* diferem quanto à formulação das equações dinâmicas, às variáveis de prognóstico usadas, ao modo como são dispostas as variáveis na malha (*grid staggering*), e quanto ao método de integração temporal (Skamarock, 2005). A manutenção do WRF-ARW é da responsabilidade do NCAR; a versão 2.2 por nós utilizada e referida no seguimento abreviadamente por WRF, foi lançada a 22 de Dezembro de 2006. Para uma descrição detalhada consultar o “ARW User’s Guide” e a “NCAR Technical Note: A Description of the Advanced Research WRF Version 2”, disponíveis a partir da página Web atrás referida.

Nas aplicações reais, importa que as condições da fronteira do domínio de simulação representem, o melhor possível, o estado da atmosfera vizinha ao longo do tempo de integração. Essas condições são avançadas a partir de valores de saída de um modelo de previsão numérica do tempo que considera todo o Globo. O estado inicial é definido a partir dos valores de análise nos vértices da malha global. A realização de simulações retrospectivas permite fazer uso do acervo de dados saídos de modelos globais com as condições do tempo passado; as previsões globais possibilitam o avanço de previsões operadas pelo modelo de área limitada. Ainda que a informação meteorológica seja apenas a que vem do modelo global, a descrição em pormenor da interacção entre a superfície e a atmosfera e a formulação não hidrostática das equações dinâmicas,

tirando proveito da economia de cálculo implicada pelo número reduzido de nós, são tidos como os aspectos chave para o sucesso dos modelos de grelha fina (distância horizontal entre nós da malha desde quilómetros até poucas dezenas de quilómetros).

No WRF os níveis verticais da malha de cálculo são valores da coordenada sigma definida em relação à componente hidrostática de pressão. Cada superfície de igual sigma é retalhada numa rede rectangular de localizações horizontais, definida no plano de uma projecção cartográfica particular. O WRF suporta 3 projecções, cuja escolha depende das latitudes em consideração: Mercator; Cónica Conforme de Lambert; Polar Estereográfica. Qualquer uma pode ser afinada para a região varrida pela malha, mediante a atribuição das latitudes dos paralelos isométricos, de modo a minimizar a variação latitudinal do módulo de deformação linear da projecção. A topografia, o tipo e utilização do solo, o recorte da linha costeira, e os outros parâmetros fisiográficos que caracterizam a superfície (albedo, coberto vegetal, cobertura de neve, cobertura de gelo no mar, representados por médias climatológicas do mês em que se inclui o período de integração) são ingeridos durante o estágio de pré-processamento que antecede a integração das equações dinâmicas (WRF Pre-Processing System, WPS). O estado inicial é obtido por interpolação espacial dos dados de análise do modelo global: interpolação horizontal das variáveis meteorológicas (altura geopotencial, vento, temperatura, razão de mistura) em cada nível isobárico, e das variáveis da superfície (pressão atmosférica, *skin temperature*) e dos níveis do subsolo (temperatura e humidade do solo). Num segundo momento, já no bloco de inicialização do *core* ARW, é feita uma interpolação vertical adequada à grelha de cálculo do modelo, com a coordenada sigma em vez da pressão. O esquema de *grid-staggering* é do tipo Arakawa-C. As condições de fronteira lateral são obtidas por interpolação das previsões do modelo global sobre os nós que contornam a malha e nos sucessivos incrementos de tempo de integração. A fronteira superior é uma superfície de pressão constante. A *performance* do WRF pode ser melhorada por um sistema de assimilação variacional de dados observados, de modo a otimizar o cálculo do estado inicial: o pacote WRF-Var, incluído na versão actual do modelo (não utilizado).

O WRF suporta o aninhamento (*nesting*) de um domínio mais pequeno e de malha mais fina, no interior de um domínio maior com uma malha mais larga. O domínio aninhado (*nest*) é controlado nas suas fronteiras laterais pelo domínio principal (*parent*). Desse modo é possível refinar a solução para uma área restrita sem os custos computacionais implicados no recurso a uma malha fina em toda a parte; além disso, o *nesting* opera um *downscaling*

gradual, pois uma corrida feita unicamente com um domínio de elevada resolução encostado à malha do modelo global teria uma definição espacial e temporal das suas condições de fronteira mais pobre. Um domínio pode conter mais do que um subdomínio, na condição de que as suas áreas não se sobreponham. Um *nest* pode funcionar como *parent* em relação a um domínio ainda mais pequeno. Há dois modos de realizar uma corrida do modelo com *nesting*: 1) o *nest* é integrado em simultâneo com o domínio principal, ou mais tarde, recorrendo aos sucessivos *outputs* do *parent*; 2) ao fim de cada incremento de tempo do domínio principal, o *nest*, que executa mais passos no mesmo intervalo de tempo, transmite a informação do seu estado actual aos nós da malha maior coincidentes com os nós da malha inferior; este *two-way nesting* (com *feedback*) requer apenas que a razão entre os espaçamentos das duas malhas seja ímpar, uma vez que o mecanismo de *feedback* só funciona se houver uma célula pequena centrada na célula mãe. O *input* dos valores iniciais do domínio aninhado no caso real pode ser efectuado de três maneiras opcionais: 1) os dados 3D atmosféricos, os dados do solo, da superfície do mar, e os dados estáticos (parâmetros fisiográficos) são interpolados a partir dos vértices do *parent*; 2) o *nest* tem uma inicialização própria para todos os campos; 3) os dados atmosféricos são interpolados a partir da grelha do *parent*, enquanto todos os outros resultam de uma inicialização própria do *nest*. A desvantagem da 1ª opção é a de não se tirar partido da resolução dos dados estáticos inerente à malha fina; a 2ª tem o inconveniente de não permitir iniciar o *nesting* numa hora posterior à hora 0 do domínio principal. A 3ª opção, introduzida a partir da versão 2.1, foi a utilizada neste trabalho.

No WRF os esquemas físicos, implementados em módulos separados, são classificados de acordo com a função que desempenham:

- | | |
|---|--|
| • <i>LW radiation</i> (LW) | • <i>SW radiation</i> (SW) |
| • <i>Microphysics</i> (MP) | • <i>Cumulus parameterization</i> (CP) |
| • <i>Surface layer</i> (SL) | • <i>Land Surface Model</i> (LSM) |
| • <i>Planetary boundary layer</i> (PBL) | |

Os esquemas LW resolvem as trocas radiativas de “onda longa” (banda infravermelha); os esquemas SW resolvem as trocas radiativas de “onda curta” (luz e ultravioleta); os esquemas MP resolvem os processos de condensação e evaporação no ar; os esquemas SL resolvem o atrito e os fluxos de calor, de quantidade de movimento e de vapor de água na camada de atrito, junto ao solo; os esquemas LSM resolvem as trocas de calor e de água no interior do solo; os esquemas PBL tratam as trocas turbulentas não apenas na camada limite planetária, que confina com a terra e o mar, mas ao longo de toda a coluna

vertical do modelo; os esquemas CP resolvem as nuvens de origem convectiva. Dentro de cada classe, o WRF-ARW v2.2 coloca à escolha do utilizador os seguintes esquemas alternativos:

LW	RRTM; GFDL (Eta); CAM
SW	Dudhia (MM5); Goddard; GFDL (Eta); CAM
MP	Kessler; Lin et al.; Thompson et al.; Eta; WSM3; WSM5; WSM6; NCEP 3-class; NCEP 5-class
SL	MM5; Eta
LSM	5-layer thermal diffusion; Noha; RUC
PBL	YSU (Yonsei University); Mellor-Yamada-Janjic; MRF
CP	Kain-Fritsh; Betts-Miller-Janjic; Grell-Devenyi

Para uma descrição qualitativa das características dos vários esquemas ver Dudhia (2005, 2007). A razão por que o sistema WRF inclui tantas opções físicas é que muitos esquemas são provenientes de modelos anteriores, climatológicos (vg. CAM), de previsão do tempo em grande escala (vg. Eta) ou em mesoescala (vg. MM5), além dos que foram concebidos de raiz.

3 Domínio e datas de simulação

Seguindo uma lógica de *telescoping*, o domínio *nest*, que em teoria permite obter maior grau de resolução espacial, foi definido de modo a abarcar o território alvo de Portugal Continental; o domínio *parent* abrange toda a Península Ibérica e uma faixa marítima envolvente (Fig. 1).

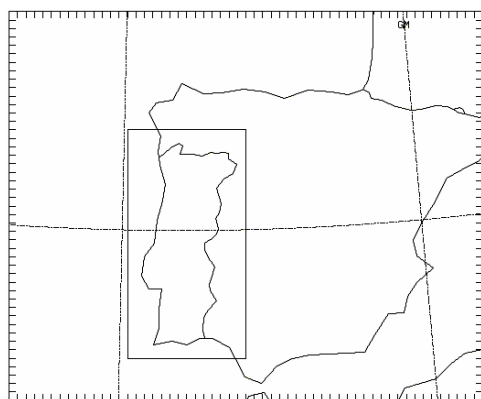


Fig. 1 Domínios de simulação; o domínio aninhado possui uma malha 3 vezes mais fina ($\Delta x \approx 8$ km)

O espaçamento da malha do domínio *parent* (visível nas margens) é exactamente 24 km nos pontos sobre os paralelos isométricos da projecção cartográfica de Lambert: 38°, 42°.

As simulações realizadas reportam-se ao ano 2006. Sendo computacionalmente impraticável levar a cabo muitas realizações do WRF para todos os dias dum ano, foi necessário fazer uma selecção prévia de um número limitado de datas. Presumindo que um modelo de escala regional deverá ser capaz de reproduzir as sinuosidades do tempo mais vincadas nessa escala, escolheu-se, dentro de cada mês, 4 dias consecutivos com condições meteorológicas mais instáveis do que a média no mês. Com esse fim, elaboraram-se cronogramas para o ano em causa dos dados observados de 4 estações de superfície situadas em Bragança, Coimbra, Évora e Lisboa, referentes à pressão atmosférica, à temperatura, à humidade relativa, às componentes do vento, à nebulosidade e ainda, para Bragança e Lisboa, à quantidade de precipitação diária acumulada; recorreu-se a dados das mesmas estações que serviram para a verificação do WRF, excepto as séries da precipitação, provenientes do ECA&D (*European Climate Assessment & Dataset, March 2007*, <http://eca.knmi.nl>). Analisando as quedas de pressão, as viragens do vento, as mudanças de temperatura, a alternância de períodos de céu coberto com períodos de céu limpo, ou de tempo chuvoso com tempo seco, foi possível despistar os períodos de tempo irregular, ou de manifesto mau tempo. A inspecção paralela das cartas de superfície do *Meteorological Office* do Reino Unido revelou várias sistemas frontais associados a depressões. Para cada período assim obtido foram concebidas 3 integrações do modelo separadas entre si de um dia, dando origem aos 36 períodos de simulação de 2 dias constantes da Tabela 1.

Tabela 1 Datas de simulação (2006)

JAN–MAR	ABR–JUN	JUL–SET	OUT–NOV
26 – 28 Jan	20 – 22 Abr	15 – 17 Jul	14 – 16 Out
27 – 29 Jan	21 – 23 Abr	16 – 18 Jul	15 – 17 Out
28 – 30 Jan	22 – 24 Abr	17 – 19 Jul	16 – 18 Out
16 – 18 Fev	24 – 26 Mai	15 – 17 Ago	13 – 15 Nov
17 – 19 Fev	25 – 27 Mai	16 – 18 Ago	14 – 16 Nov
18 – 20 Fev	26 – 29 Mai	17 – 19 Ago	15 – 17 Nov
22 – 24 Mar	12 – 14 Jun	19 – 21 Set	06 – 08 Dez
23 – 25 Mar	13 – 15 Jun	20 – 22 Set	07 – 09 Dez
24 – 26 Mar	14 – 16 Jun	21 – 23 Set	08 – 10 Dez
Início–fim: 12UT	Início–fim: 12UT	Início–fim: 12UT	Início–fim: 12UT

Notar que as simulações relativas ao mesmo mês se sobrepõem parcialmente; procurou-se desse modo captar os episódios de tempo variável na sua progressão, inicializando o modelo em diferentes fases evolutivas dos mesmos.

4 Preparação do modelo

O WRF foi preparado para uma série de corridas de 48h entre as datas da Tabela 1, variando as opções dos esquemas físicos. O modelo que serviu de *input* das variáveis atmosféricas e de superfície foi o GFS (*Global Forecast System*) operado pelos NCEP, com as análises das 12Z para o efeito de inicialização do domínio maior, e as previsões de 3 em 3 horas para a definição das condições de fronteira. Os dados têm uma resolução em latitude e longitude de 0.5° e 27 níveis verticais isobáricos, além dos dados da superfície e de 4 camadas do subsolo. Os valores estáticos da topografia, albedo, categoria do solo, coberto vegetal, etc, foram retirados das bases de dados do NCAR, com a resolução de 10 minutos de grau para o domínio maior e de 2 minutos para o domínio aninhado. O esquema de aninhamento empregue foi o *two-way nesting*, tendo-se iniciando o *nest* com 3 horas de atraso relativamente à hora de inicialização do *parent*. Significa que o *nesting* só começa quando o WRF já traz 3 horas de integração apenas com o domínio principal. Procurou-se dessa forma produzir uma transição mais gradual entre a grelha do GFS e a malha fina do WRF, assumindo que nesse lapso de tempo a malha *parent* intermédia é capaz de resolver detalhes que não se encontram nos dados meteorológicos originais, sem no entanto se afastar muito dos valores de análise; isto é, que conserva a memória do estado inicial, ao mesmo tempo que dela se desvia duma forma interessante para a definição espacial das condições iniciais e das primeiras condições de fronteira do *nest*.

O quadro abaixo indica o espaçamento horizontal e as dimensões *mass-staggered* das malhas dos dois domínios exibidos na Fig. 1.

<i>Parent:</i>	(42X) × (84Y),	$\Delta x = \Delta y = 24 \text{ km}$
<i>Nest:</i>	(56X) × (46Y),	$\Delta x = \Delta y = 8 \text{ km}$

Tabela 2 Malha horizontal dos domínios

As dimensões referem o número de células nas direcções x e y, aproximadamente nas direcções WE e SN, respectivamente. O número de níveis verticais sigma, igual para os dois domínios, foi fixado em 27, discriminando melhor a atmosfera nas camadas mais baixas. O topo do modelo (sigma = 0) foi definido para a pressão 50mb. Para o incremento temporal adoptou-se 48 s para o domínio *nest* e o triplo para o domínio *parent*, seguindo a razão entre os espaçamentos horizontais das malhas de cálculo respectivas. Os incrementos temporais satisfazem o critério de estabilidade de Courant, tendo em conta a ordem adoptada para a expansão dos termos de advecção horizontal de momento (5ª ordem) e ao esquema de integração temporal usado (Runge-Kutta

de 3ª ordem, RK3). A integração numérica procede em dois níveis: um passo maior para os movimentos meteorologicamente significativos, e dentro de cada passo elementar RK3, 4 passos mais curtos para a correcção acústica. No caso, uma hora compreende 25 passos completos para a malha principal e 75 para a malha fina.

A Tabela 3 dá conta das opções seleccionadas para os esquemas físicos. A frequência de chamada dos esquemas radiativos, dos de camada limite planetária e dos de cúmulos são indicados na parte inferior do quadro, a par dos incrementos temporais dos passos de integração.

MP:	Kessler WSM6	
LW:	RRTM, with cloud effect	
SW:	Dudhia, with cloud effect Goddard	
SL/PBL:	MM5/YSU, with fluxes from surface Eta/Mellor-Yamada-Janjic	
LSM:	Noah → 4 layers	
CP:	Kain-Fritsh Betts-Miller-Janjic Grell-Devenyi	
<hr/>		
	- Parent -	- Nest -
PBL calls:	every step	every step
Rad calls:	10 steps	10 steps
CP calls:	5 steps	5 steps
1 step =	144s	48s

Tabela 3 Opções físicas seleccionadas

Os esquemas físicos da radiação de onda longa (LW) e do *Land Surface Model* (LSM) são fixos. Para os esquemas da microfísica (MP), da radiação solar de onda curta (SW) e das camadas de superfície e limite planetária (SL/PBL) tomaram-se duas variantes. Em relação ao esquema de parametrização de cúmulos (CP) consideraram-se três. Da combinação das opções em jogo resultam as 24 configurações físicas representadas na Tabela 4. Em relação aos esquemas da microfísica (MP), quisemos contrapor o mais avançado dos esquemas WSMMP's (WRF Single Moment Microphysics), o WSM6, que inclui todas as formas aquosas de precipitação, ao esquema muito menos sofisticado de Kessler (na versão renovada vinda do Eta), um esquema de *warm-rain*, sem gelo. Para modelar as trocas de radiação térmica (LW) elegeu-se o RRTM (*rapid radiation transfer model*, utilizado p. ex. no GFS), um esquema com a reputação de ser fiável e eficiente, juntamente com a opção de incluir o efeito das nuvens. Para as trocas da radiação solar não infravermelha (SW) decidiu-se comparar o esquema

simples de integração da radiação descendente de Dudhia (vindo do MM5) com o esquema de 8 bandas do Goddard Space Flight Center; ambos levam em conta o efeito das nuvens, no primeiro esquema opcionalmente; o Goddard inclui a camada de ozono, definida em média climatológica do mês em causa. Em relação à camada de superfície (SL), testaram-se os dois esquemas de similaridade disponíveis, o primeiro vindo do modelo MM5 e o segundo do modelo Eta. Quanto à camada limite planetária (PBL), descartou-se o esquema MRF, por ser uma versão antiga (que irá ser retirada) do esquema da Yonsei University, YSU; o esquema PBL YSU deve ser usado em concomitância com o esquema SL MM5, ao passo que o esquema PBL de Mellor-Yamada-Janjic deve ser usado com o esquema SL Eta. Daí que as opções para os esquemas SL e PBL apareçam emparelhadas. Para o modelo de subsolo (LSM) tomou-se o Noah (desenvolvido em conjunto pelo NCAR, os NCEP e a AFWA), um modelo de 4 camadas que inclui a humidade. Finalmente, usaram-se os 3 esquemas de parametrização das nuvens convectivas (CP) disponíveis, aperfeiçoados para uso no WRF a partir de versões mais simples, com base em simulações de modelos anteriores, sendo que o de Grell-Devenyi é um método de múltiplos parâmetros que produz uma média de *ensemble* com pesos pré-definidos. Para malhas com espaçamento < 5 km não se recomenda o uso de parametrização de cúmulos, visto que a convecção pode ser resolvida pela malha (Gilliland e Rowe, s/d). No caso, ambas as malhas (8 km, 24 km) justificam aquela parametrização. Os esquemas CP, SW e LW não precisam de ser chamados em todos os passos de integração; a escolha de um intervalo de tempo entre chamadas inferior ao incremento temporal da integração das equações dinâmicas reduz o trabalho de cálculo.

Para o cálculo do coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal usou-se o esquema 2D de 1ª ordem de Smagorinsky; a difusão turbulenta vertical é automaticamente assegurada pelo esquema PBL. A temperatura da superfície do mar (SST) foi fixada para o valor da hora de análise, atendendo ao prazo relativamente curto das previsões. Quanto a outras opções dinâmicas e numéricas foram seguidas as recomendações gerais do “ARW User’s Guide” para o caso em aplicação.

O WRF-ARW v2.2 foi instalado numa plataforma GNU/Linux 32-bit com processador Intel *dual-core* de 2.40GHz. As simulações – 864 *runs* do modelo dinâmico e 36 do módulo de pré-processamento (definição das malhas de cálculo e ingestão dos valores de *input*) – foram repartidas por 4 máquinas cedidas pelo Grupo de Meteorologia e Climatologia da Universidade de Aveiro (CliM@UA).

Tabela 4 Configurações físicas testadas

	MP		SW		SL/PBL		CP		
	Kessler	WSM6	Dudhia	Coddard	MM5/YSU	Eta/Mellor-Yamada-Janjic	Kain-Fritsch	Betts-Miller-Janjic	Grell-Devenyi
1	*		*		*		*		
2	*		*		*			*	
3	*		*		*				*
4	*		*			*	*		
5	*		*			*		*	
6	*		*			*			*
7	*		*	*	*		*		
8	*		*	*	*			*	
9	*		*	*	*				*
10	*		*	*		*	*		
11	*		*	*		*	*	*	
12	*		*	*		*			*
13	*	*	*	*	*		*		
14	*	*	*	*	*			*	
15	*	*	*	*	*				*
16	*	*	*	*	*	*	*		
17	*	*	*	*	*	*	*	*	
18	*	*	*	*	*	*	*		*
19	*	*	*	*	*	*	*	*	
20	*	*	*	*	*	*	*	*	
21	*	*	*	*	*	*	*	*	*
22	*	*	*	*	*	*	*	*	
23	*	*	*	*	*	*	*	*	*
24	*	*	*	*	*	*	*	*	*

5 Testes contra as observações

A tabela abaixo resume as grandezas que serviram para comparar as séries de valores observados com as séries simuladas para os mesmos locais, bem como a nomenclatura adoptada no seguimento para as mesmas:

<i>Temperatura do ar a 2 metros</i>	T2
<i>Razão de mistura a 2 metros</i>	Q2
<i>Intensidade do vento a 10 metros</i>	Wind10S
<i>Rumo do vento a 10 metros</i>	Wind10D

Tabela 5 Variáveis testadas ponto a ponto

Sendo a razão de mistura uma medida pura do conteúdo do ar em vapor de água, enquanto a humidade relativa depende das condições de pressão e temperatura, considerou-se a primeira grandeza. A temperatura do ar e a razão de mistura aos 2 m são variáveis saídas do modelo, ao passo que a direcção e a intensidade do vento se deduzem das saídas das componentes do vento nas direcções x e y da malha de simulação a 10 metros (*U10*, *V10*). As duas componentes tiveram que ser corrigidas para dar o vento segundo as direcções geográficas da projecção cartográfica. Para obter os valores de previsão sobre os locais das estações meteorológicas usou-se um esquema de interpolação bilinear a partir dos valores dos de saída nas coordenadas dos nós do domínio aninhado, com necessárias modificações atendendo à obliquidade entre os lados das células da malha rectangular e as linhas coordenadas da projecção.

Tabela 6 Estações meteorológicas

WMO index		LAT	LON	ALT
8575	Bragança	41°48'N	6°44'W	692 m
8570	Castelo Branco	39°50'N	7°29'W	384 m
8548	Coimbra/Cernache	40°09'N	8°28'W	179 m
8558	Évora/C.Coordenador	38°32'N	7°54'W	246 m
8554	Faro/Aeroporto	37°01'N	7°58'W	8 m
8579	Lx/Gago Coutinho	38°46'N	9°08'W	105 m
8545	Porto/Pedras Rubras	41°14'N	8°41'W	77 m

As observações referem-se ao conjunto de 7 estações meteorológicas da rede da OMM assentes em solo português figuradas na Tabela 6. As séries temporais das variáveis meteorológicas dessas estações para o ano em estudo, 2006, foram descarregadas a partir do site <http://meteo.infospace.ru>:

Variáveis observadas

Pressão atmosférica	<i>P</i>
Temperatura do ar	<i>T</i>
Humidade relativa	<i>RH</i>
Intensidade do vento de superfície	<i>ff</i>
Rumo do vento de superfície	<i>dd</i>

As séries são dadas em regra de 3 em 3 horas: 00UT, 03UT, etc, sendo nessa base que foi efectuada a comparação com os resultados das simulações. A pressão atmosférica é a pressão na estação, sem correcção de altitude; a temperatura do ar é medida a 2 metros acima da superfície do solo, ao abrigo da radiação solar; a humidade relativa é medida nas mesmas condições; o vento de superfície é medido a 10 metros acima do solo, livre de obstáculos. Os dados do vento não são de interpretação directa, por não se dispôr de informação na fonte sobre o intervalo de tempo em que o mesmo é estimado. Refira-se que a velocidade do vento é discretizada a intervalos de 1 m/s e o rumo a intervalos de 10°. Enquanto grandeza observada, a razão de mistura é derivada a partir da pressão *P*, da temperatura *T* e da humidade relativa *RH*:

$$Q \equiv 0.622 \frac{e}{P - e} = 0.622 \frac{e_s}{P - e_s} RH \quad (1)$$

onde *e* é a tensão de vapor e *e_s* o seu valor de saturação, de acordo com a definição de humidade relativa recomendada pela OMM, tendo-se deduzido a tensão de vapor de saturação da equação de Clausius-Clayperon combinada com a lei empírica de variação linear do calor latente de condensação com a temperatura (Borhen e Albrecht, 1998):

$$e_s = e_{s0} \exp \left\{ A \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) - B \ln \frac{T}{T_0} \right\}, \quad (2)$$

$$A = 6808 \text{ K}, \quad B = 5.09,$$

tomando o ponto de gelo à pressão atmosférica padrão *T₀* = 273.15 K, e *e_{s0}* = 610.94 Pa.

Calcularam-se dois tipos de medidas de erro, que traduzem o afastamento entre os valores simulados e os valores observados: o *valor médio quadrático do erro*,

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Phi'_i)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

e o *erro médio*:

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Phi'_i \quad (4)$$

onde

$$\Phi'_i = \Phi_{i,f} - \Phi_{i,obs} \quad (5)$$

representa o desvio entre um valor individual de previsão e o valor observado no mesmo local e no mesmo instante, e *N* é o número de verificações. A dispersão dos erros individuais é dada pelo *desvio padrão do erro*:

$$STDE = \left[(RMSE)^2 - (Bias)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

Previsões mais acertadas implicam um *RMSE* mais pequeno, e a inversa também é verdadeira. O *Bias* não fornece a melhor indicação do acerto das previsões com as observações, antes representando o enviesamento das previsões em termos médios: sendo positivo, significa que tendem a sobrestimar os valores observados, e o contrário quando seja negativo. Um *Bias* mais pequeno em valor absoluto,

relativamente a um mesmo conjunto de observações, não significa que as previsões sejam mais acertadas, a menos que o *STDE* seja muito inferior ao *RMSE*. Em relação ao rumo vento (direcção de onde sopra, medida em graus de arco desde o N geográfico no sentido dos ponteiros do relógio), convencionou-se ser a diferença Φ' positiva quando o vector da velocidade do vento simulado se desvia em sentido horário relativamente ao vector da velocidade do vento observado. Assim, nas latitudes Norte em consideração, um *Bias* positivo (negativo) indicará que o vento previsto se coloca, em média, em viés anticiclónico (cyclónico) em relação ao vento observado. Como o desvio absoluto do rumo do vento não pode exceder 180 graus, a diferença (5) tem que ser modificada quando o módulo ultrapassa esse valor :

$$\Phi' = \Phi' [1 - 360/|\Phi'|], \quad |\Phi'| > 180^\circ \quad (7)$$

O cálculo dos erros foi feito separadamente para cada trimestre do ano em apreciação e para diferentes prazos de previsão. Sendo 9 o número de datas de inicialização por trimestre e 7 o número de locais de verificação, obtém-se, supondo que não há falta de dados, $N = 63$. Na prática, verificam-se lacunas nos registos meteorológicos pelo que o número efectivo de comparações para cada prazo de previsão nem sempre atinge o valor indicado. Algumas horas não estão representadas em todas as estações; o número de observações da direcção do vento é algo inferior ao da velocidade do vento, o que se deve a situações de vento suave em que a informação do rumo às vezes se perde, ou de vento calmo com registo de velocidade igual a zero. Não foi feita qualquer correcção aos valores de saída do WRF que levasse em conta a diferente resolução temporal entre medidas e previsões. Sobre a resolução temporal dos dados de observação, a qual dependerá do tempo de resposta dos instrumentos de observação e da precisão temporal da leitura, não se possui informação. Há ainda a considerar a desigual precisão numérica dos valores comparados, que ganha acuidade quanto ao vento; a disparidade entre a precisão dos valores da direcção e da velocidade observadas (metade do menor intervalo entre os valores), $\delta(dd) = 5^\circ$, $\delta(ff) = 0.5$ m/s, e a precisão dos valores derivados do modelo, que pode ser desprezada, introduz uma incerteza nas medidas trimestrais ($N=60$) do *Bias* e do *RMSE* dada por: $\delta(dd) / \sqrt{N} \sim 0.6^\circ$, $\delta(ff) / \sqrt{N} \sim 0.06$ m/s. O teste de sensibilidade às parametrizações físicas consistiu em repetir, para cada uma das 24 realizações do modelo, o cálculo do *Bias* e do *RMSE* referentes às previsões interpoladas sobre todos os locais das estações meteorológicas a partir da malha do domínio aninhado, resultantes das 9 simulações por trimestre. Os pares de valores {(erro, prazo-de-previsão)} postos na forma de curvas representam a evolução

estatística dos erros – relativa aos conjuntos das datas e das estações que serviram de amostra – com o prazo de previsão. A comparação das 24 curvas, para uma dada variável, um tipo de erro e uma dada época, permite distinguir o efeito que a variação da formulação física do modelo acarreta no acordo das previsões da variável com as observações situadas dentro dessa época. A comparação de curvas homólogas referentes a diferentes trimestres permite apreciar a variação sazonal dos erros. Como a hora de inicialização é fixa, cada prazo de previsão corresponde a uma hora precisa do Tempo Universal, ou tempo civil de Greenwich. A maior distância em longitude entre as sete estações meteorológicas (2.4° entre Bragança e Lisboa) traduz-se num desvio do tempo civil local, igual ao do tempo solar médio, que não ultrapassa 10 minutos de hora. Assim, as curvas de erro não traduzem sómente a evolução do erro com o prazo de previsão, mas reflectem também as variações diurnas.

6 Resultados e discussão

A série de Figuras 2a-d a 5a-d mostra as curvas obtidas para o *Bias*, *RMSE*, e *STDE* definidos nas Eqs. (3)-(6), em função do tempo decorrido desde a hora de inicialização do domínio principal (*parent*), 12 UT. O título acima dos gráficos indica o tipo de erro, a variável, e o trimestre. A designação das variáveis segue a nomenclatura da Tabela 5. Os erros reportam-se às previsões saídas do domínio aninhado (*nest*), que começam invariavelmente 3 horas depois, 15 UT. As simulações terminam às 12 UT, 48 horas à frente da inicialização do modelo. As datas de simulação e as estações meteorológicas que serviram para a verificação, tomadas em conjunto no cálculo dos erros, foram referidas nas Tabelas 1 e 6. Cada curva é a representação gráfica da função spline cúbica interpoladora da função de erro determinada em 16 nós: *forecast time* = 3h, 6h, ..., 48h. As formulações do modelo diferem entre si pela combinação das opções para os esquemas físicos referidas na Tabela 4. Atendendo ao número de variantes envolvidas, desdobrou-se cada gráfico em dois: um superior contendo as variantes com o esquema de microfísica (MP) de Kessler, e um inferior com o esquema WSM6. Dentro de cada caso, o tipo de traço distingue as duas opções para o esquema de radiação (SW), Goddard e Dudhia. As cores distinguem as seis combinações dos dois esquemas associados de camada de superfície e de camada limite planetária (SL/PBL), MM5/YSU e Eta/Mellor-Yamada-Janjic, com os três esquemas de parametrização de cúmulos (CP), Kain-Fritsh, Betts-Miller-Janjic e Grell-Devenyi. As curvas das variantes físicas do modelo não começam todas no mesmo ponto porque as diferenças resultantes das primeiras 3 horas de integração do domínio *parent*

são transmitidas ao *nest* na inicialização mais tardia deste.

Temperatura do ar a 2 metros (T2)

As Figuras 2a-d mostram as curvas de erro da temperatura. Tanto o valor absoluto do *Bias*, como o *STDE* e o *RMSE*, tendem a ser superiores durante o dia. Esse aspecto reflecte a maior variabilidade das condições de temperatura durante as horas de sol, tornando as previsões mais falíveis. Em todas as épocas o esquema radiativo Goddard tende a produzir um *Bias* mais positivo (menos negativo quando o mesmo é negativo) do que o de Dudhia. O efeito dos esquemas de microfísica pode ser apreciado em todos os trimestres, mas é no período Abril-Junho que se observa uma grande diferença quanto aos dois esquemas testados, quando o WSM6 apresenta um erro médio absoluto claramente inferior ao Kessler, este último produzindo um forte viés negativo que atinge -4 K; ainda nesse período, a interacção entre os esquemas radiativos e de microfísica é notável comparando as curvas do *RMSE* relativas aos dois esquemas MP; quando combinado com o esquema MP de Kessler, o esquema SW Goddard é francamente melhor, mas essa diferença desaparece com o esquema MP WSM6, o qual de resto produz um erro mais pequeno. A influência da microfísica na temperatura do ar não é surpreendente, dado que ela envolve o intercâmbio de calor latente entre o ar e a água nele contida, além de que a formação de nuvens altera os cálculos radiativos do modelo. O *Bias* é geralmente inferior a 1 K, mas o *RMSE* anda em média próximo dos 2 K. A progressão do erro médio quadrático traduz-se num aumento da ordem de 0.5 K ao longo das 48 horas de previsão, sendo maior com o esquema de Kessler nos meses de Abril-Junho.

Razão de mistura a 2 metros (Q2)

Os erros da razão de mistura de vapor estão representados nas Figuras 3a-d. A variação sazonal é saliente, tanto no *Bias* como no *RMSE*, sobretudo na transição do 1º para o 2º trimestre, onde se passa dum regime de erro quase constante ao longo do tempo de previsão, pouco dependente da variação dos esquemas físicos, para um regime totalmente inverso. À excepção de Janeiro-Março, o *Bias* tende a crescer nas primeiras horas do dia e a diminuir ao cair da noite. Em Julho-Setembro existe uma separação sensível entre as curvas do *Bias* consoante estas se agrupem num ou no outro dos dois esquema SL/PBL, com o par Eta/Mellor-Yamada-Janjic a produzir um maior número de previsões acima do valor observado do que o MM5/YSU. Na época Outubro-Dezembro é nítida a separação das curvas que partilham o esquema de parametrização de cúmulos Betts-Miller-Janjic de todas as outras, tendo as primeiras um *Bias* mais negativo. No entanto, a

dispersão dos erros entre estações e datas de simulação, representada pelo *STDE*, faz com que as diferenças assinaladas apareçam mitigadas no *RMSE*. O *RMSE* é mínimo em Janeiro-Março, rondando 0.75 g/kg, e máximo no período oposto de Julho-Setembro, cerca do dobro.

Rumo do vento de superfície (Wind10D)

O rumo do vento é a variável que apresenta maior flutuação dos erros ao longo do tempo, como se vê pelas Figuras 4a-d. A amplitude dessas flutuações é máxima no período Abril-Junho, secundado pelo período seguinte Julho-Setembro. Um aspecto saliente é o *Bias* geralmente positivo, denotando que o vento previsto se desvia do vento observado no sentido horário. As curvas de *Bias* relativas às várias configurações são em geral confusas, interceptando-se em vários pontos, excepto nos meses de Outubro-Dezembro. Nestes, é perceptível uma divisão em dois grupos, em resultado da escolha dos esquemas associados SL/PBL, mostrando que a associação Eta/Mellor-Yamada-Janjic produz um *Bias* inferior. No desvio padrão do erro *STDE* e no erro médio quadrático *RMSE* as diferenças são muito ligeiras. Nos meses de Primavera e de Verão, quando a dispersão espácio-temporal do erro é maior, o *RMSE* atinge um pico de cerca de 60 graus nas primeiras horas da noite, decaindo nas horas seguintes. Atendendo ao *STDE*, o erro raramente ultrapassa um quadrante.

Intensidade do vento de superfície (Wind10S)

As curvas de erro relativas à velocidade do vento são exibidas nas Figuras 5a-d. Num simples relance, em todos os trimestres, embora mais nos trimestres mais frios de Outubro até Março, podemos observar uma divisão das curvas do *Bias* e do *RMSE* em dois grupos: as que representam as previsões com os esquemas (SL/PBL) associados MM5/YSU e as que representam as previsões com os alternativos Eta/Mellor-Yamada-Janjic, com erros inferiores para o MM5/YSU. Presumivelmente, este calcula melhor o atrito junto ao solo. A mesma diferença pouco se altera com a variação dos esquemas radiativos, mas a combinação MM5/YSU + Dudhia tende a ser favorável, com picos menos pronunciados durante as horas de maior irradiância solar. O *Bias* é quase sempre positivo, indicando uma sobrestimação da velocidade do vento, com um erro médio que na formulação MM5/YSU raramente ultrapassa 1 m/s. O *STDE*, da ordem de 2 m/s, mostra apenas ligeiras diferenças entre as configurações físicas. Este valor elevado do desvio padrão do erro explica que a diferença assinalada para os esquemas SL/PBL seja diminuta no erro médio quadrático daqueles casos em que a diferença no erro médio é mais pequena, designadamente, no período Abril-Setembro; mas, nos meses opostos de Outono e Inverno a diferença

no *RMSE* é ainda pronunciada.

De modo geral, o aumento dos erros com o prazo de previsão, perceptível por detrás das variações de grande amplitude de curto prazo, é muito gradual. Um aspecto comum a todas as variáveis e a todos os trimestres é o aumento da largura característica da dispersão dos erros entre as 24 configurações com o tempo, indicando que as diferentes realizações do modelo divergem progressivamente nos resultados por elas produzidos. Essa dispersão acentua-se em regra durante o dia. A dispersão do conjunto das previsões da direcção do vento e da razão de mistura experimenta variações estacionais acentuadas. Nas curvas referentes à temperatura verificam-se grandes diferenças ao início da tarde do 2º dia de integração (mais ou menos à hora da temperatura máxima do dia). Claramente, as formulações físicas do modelo respondem de maneira mais variada na previsão da temperatura máxima do dia do que da temperatura mínima. A dispersão das previsões é menor nos trimestres centrados no solstício de Inverno; em contraste, no semestre Julho-Setembro, quando há mais convecção térmica, as diferenças ampliam-se.

7 Conclusões

Os testes realizados com o modelo WRF-ARW demonstraram a sensibilidade das previsões dos parâmetros atmosféricos de superfície à variação dos esquemas de parametrização dos processos físicos. A parametrização de cúmulos revelou ser o factor menos sensível. Em contraste, a variação dos esquemas de superfície e da camada limite planetária (SL/PBL) provou ter uma influência significativa na previsão da intensidade do vento junto ao solo, sobretudo no meses de Outono e Inverno, onde o par MM5/YSU apresenta um padrão de desempenho claramente superior ao Eta/M-Y-J. A diferença de desempenho entre os esquemas radiativos Dudhia e Goddard em conjugação com os esquemas de microfísica Kessler e WSM6 na determinação da temperatura do ar foi também demonstrada, verificando-se que a combinação Dudhia + WSM6 obtém a melhor prestação ao longo do ano; no período Abril-Junho a variação na microfísica mostrou-se muito mais importante do que a variação no esquema radiativo. A direcção do vento apresenta um viés quase sempre anticiclónico. Apesar de nas outras variáveis o erro médio (*Bias*) apresentar variações nítidas com a modificação dos esquemas físicos, a dispersão do erro entre locais e entre datas de verificação (*STDE*) reduz as diferenças entre os erros quadráticos médios (*RMSE*). Assim, em relação ao rumo do vento e à razão de mistura, as diferenças observadas entre as combinações das opções para os esquemas físicos não se traduzem, em termos médios sobre o intervalo de tempo de simulação considerado, em diferenças de erro de

previsão significativas.

A dispersão observada entre os resultados das 24 configurações físicas testadas ilustra o processo de diferenciação das várias realizações do modelo, diferente consoante a época do ano e geralmente maior no trimestre Abril-Junho. As variáveis que apresentam erros quadráticos mais diferenciados são a temperatura e a velocidade do vento; no entanto a razão de mistura mostrou ser também muito sensível aos processos de sub-grelha quando se considera apenas o erro de viés. A representação dos erros médios de previsão em função do tempo sempre a partir da mesma hora UT de análise num domínio geograficamente limitado, portanto em função da hora do dia, pôs em evidência as variações diurnas do erro. Os erros mais elevados, e mais variados, durante o dia são um sinal da maior agitação da atmosfera junto ao solo durante as horas de influxo solar, levando a previsões menos acertadas e mais díspares. Uma avaliação do desempenho que tivesse em conta a variabilidade do elemento em estudo deveria utilizar uma medida de erro normalizada pela dispersão dos valores comparados, por exemplo, dividindo o quadrado do *RMSE* pela variância dos valores observados (Murphy *et al.*, 1989).

Ao reunir previsões-observações de locais dispersos pretendeu-se dar uma representação razoável, dentro do possível, do território alvo. Porém, o clima de Portugal Continental apresenta variações geográficas importantes que se perdem na amálgama estatística dos locais de verificação, pelo que um estudo por regiões seria potencialmente mais informativo. Do mesmo modo, conviria analisar situações de tempo tipificadas. Não havendo dois anos iguais, um estudo do género que pretendesse ter uma aplicação segura na previsão do tempo teria de incluir simulações retrospectivas de outros anos.

Finalmente, a realização de testes de sensibilidade com maior número de combinações das opções disponíveis no WRF, seja dos esquemas físicos ou outras, além de levantar dificuldades na análise dos resultados, torna-se computacionalmente irrealizável a partir de um certo número de possibilidades muito inferior ao permitido. Tal desiderato requer uma abordagem diversa, sem percorrer exaustivamente o espaço das realizações possíveis do modelo. Trata-se de um problema de optimização global num espaço discreto, conhecido de outras áreas da ciência, acessível e com potencialidades práticas na afinação dum modelo atmosférico com as características do WRF.

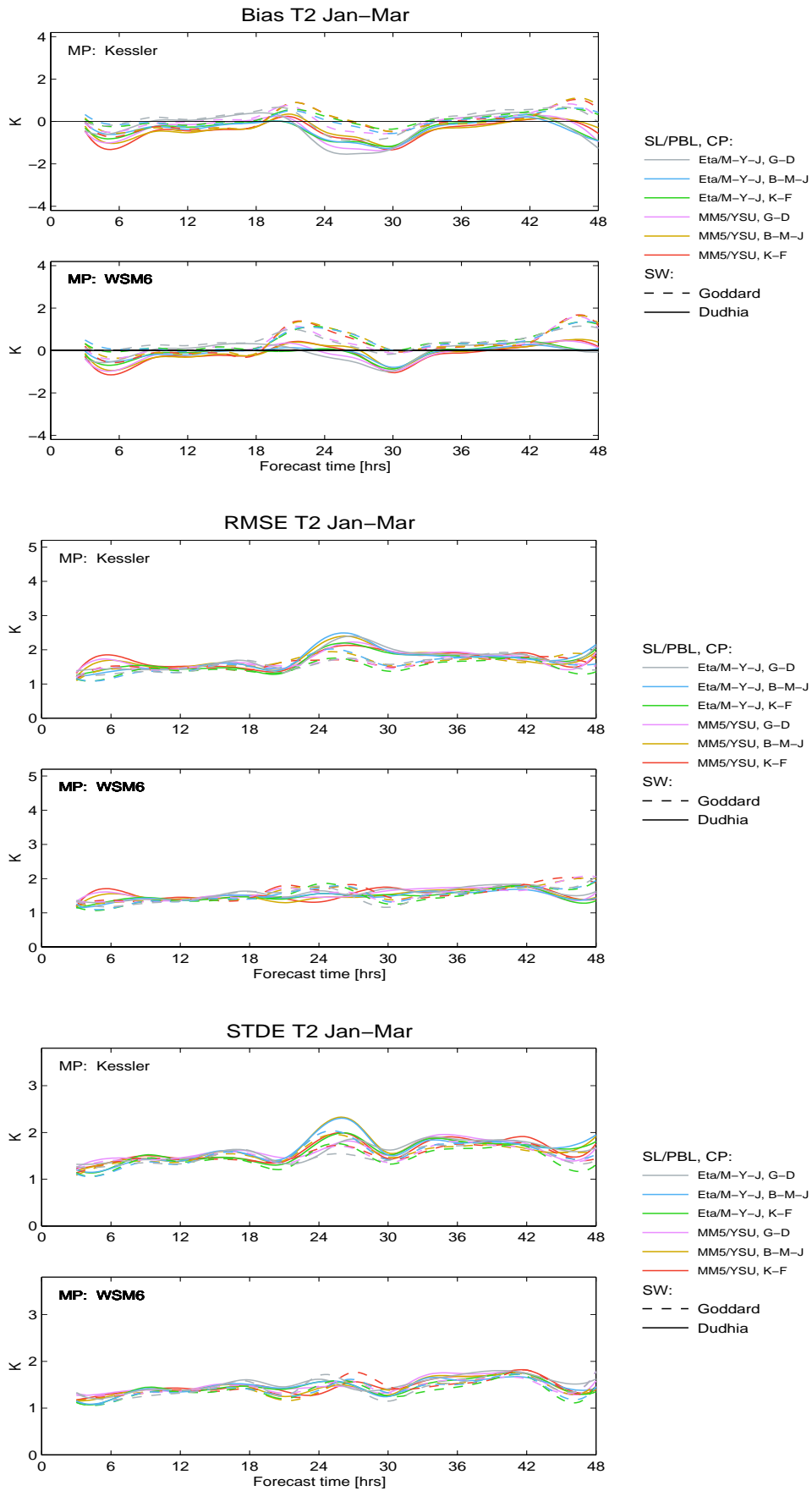


Fig. 2a Erros das previsões da temperatura a 2 m: Janeiro-Março

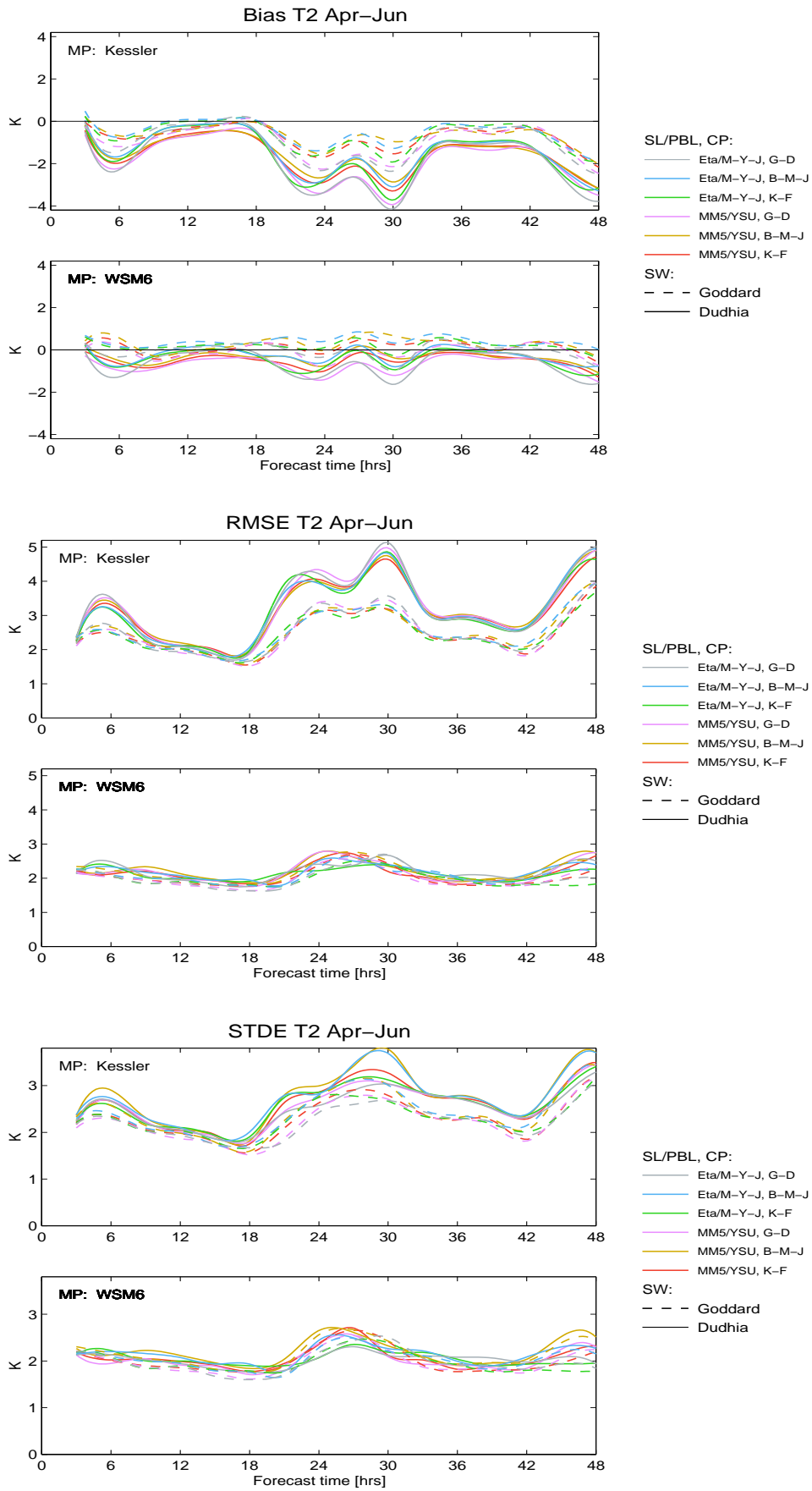


Fig. 2b Erros das previsões da temperatura a 2 m: Abril-Junho

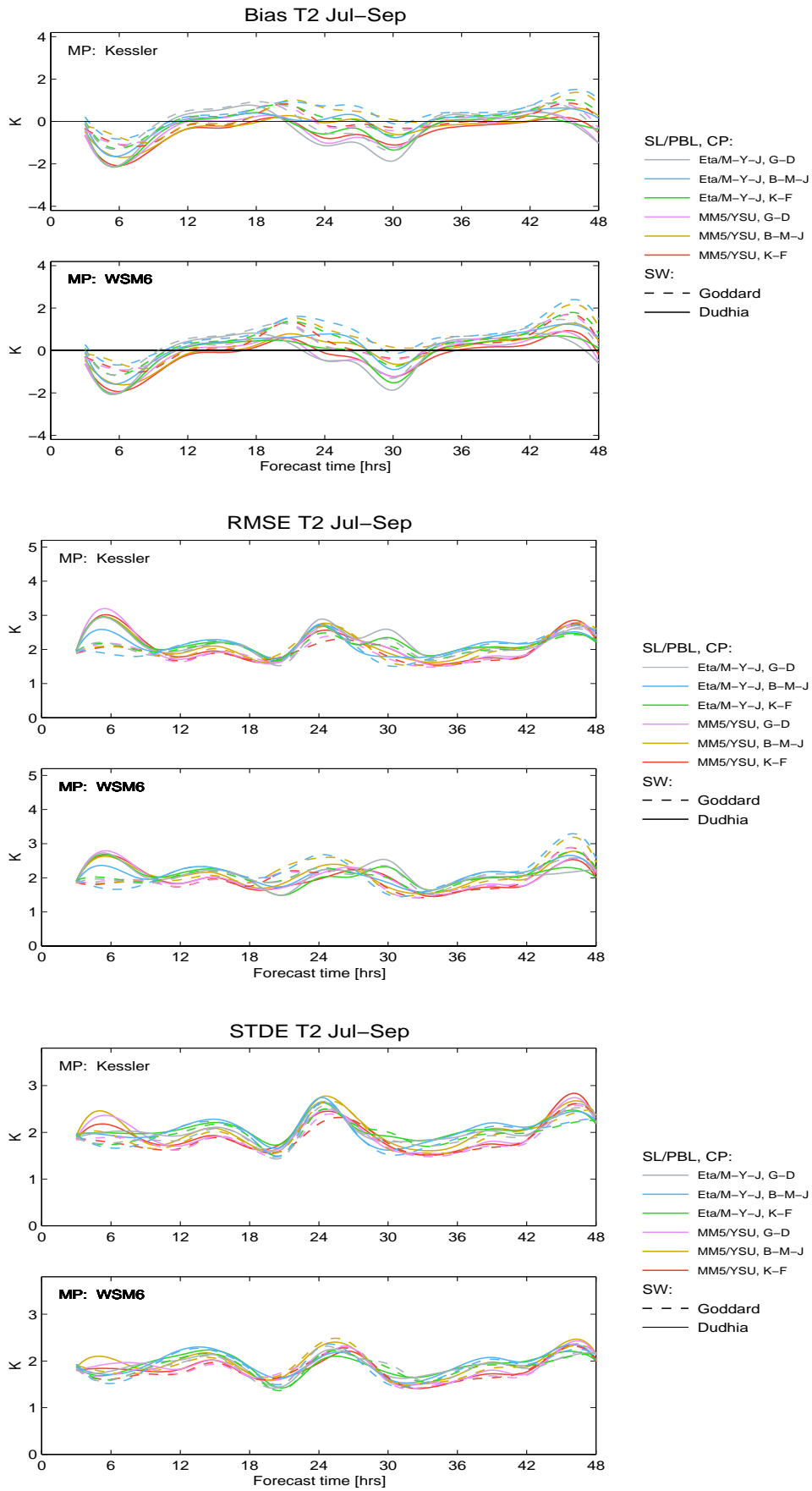


Fig. 2c Erros das previsões da temperatura a 2 m: Julho-Setembro

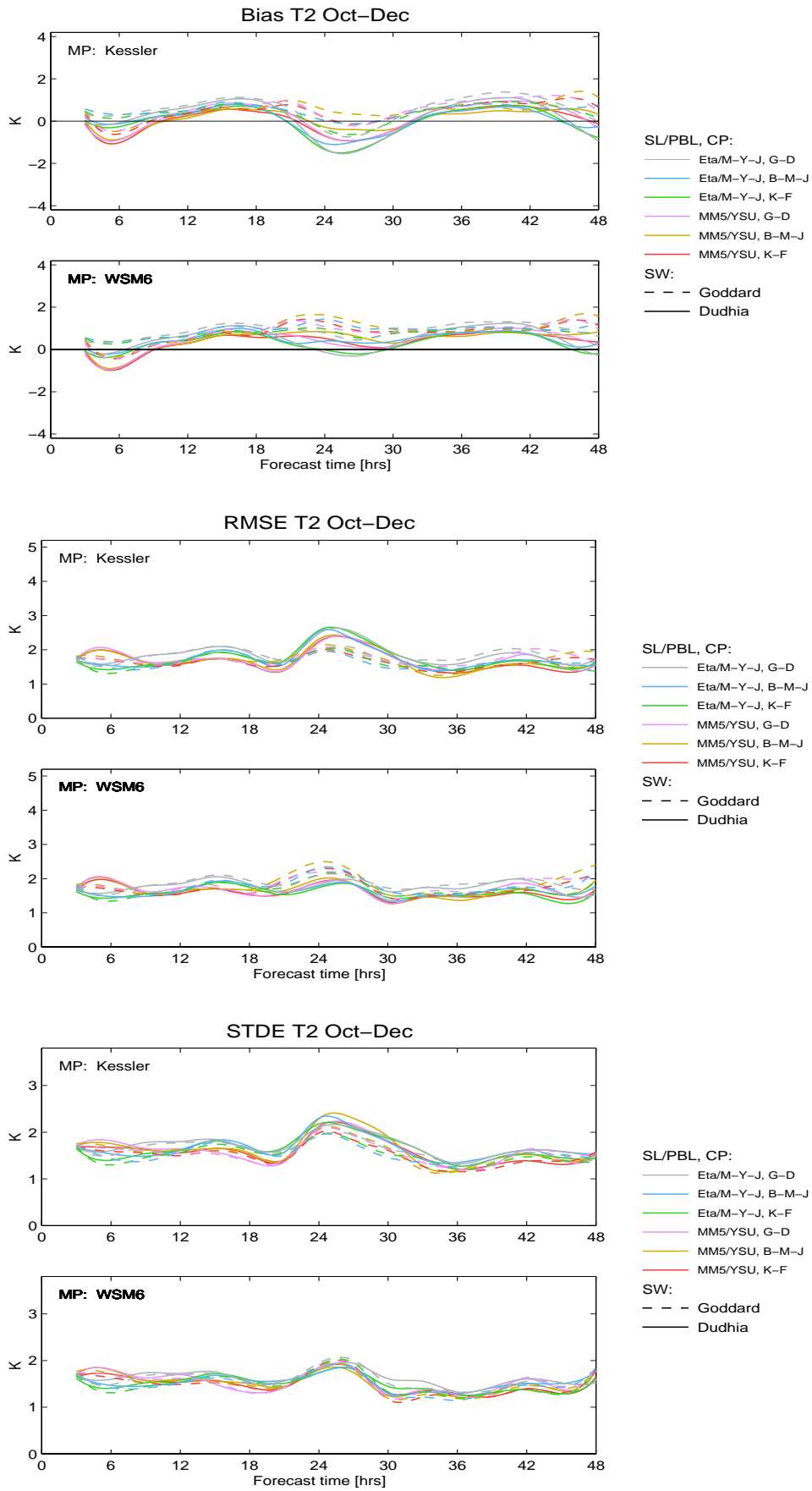


Fig. 2d Erros das previsões da temperatura a 2 m: Outubro-Dezembro

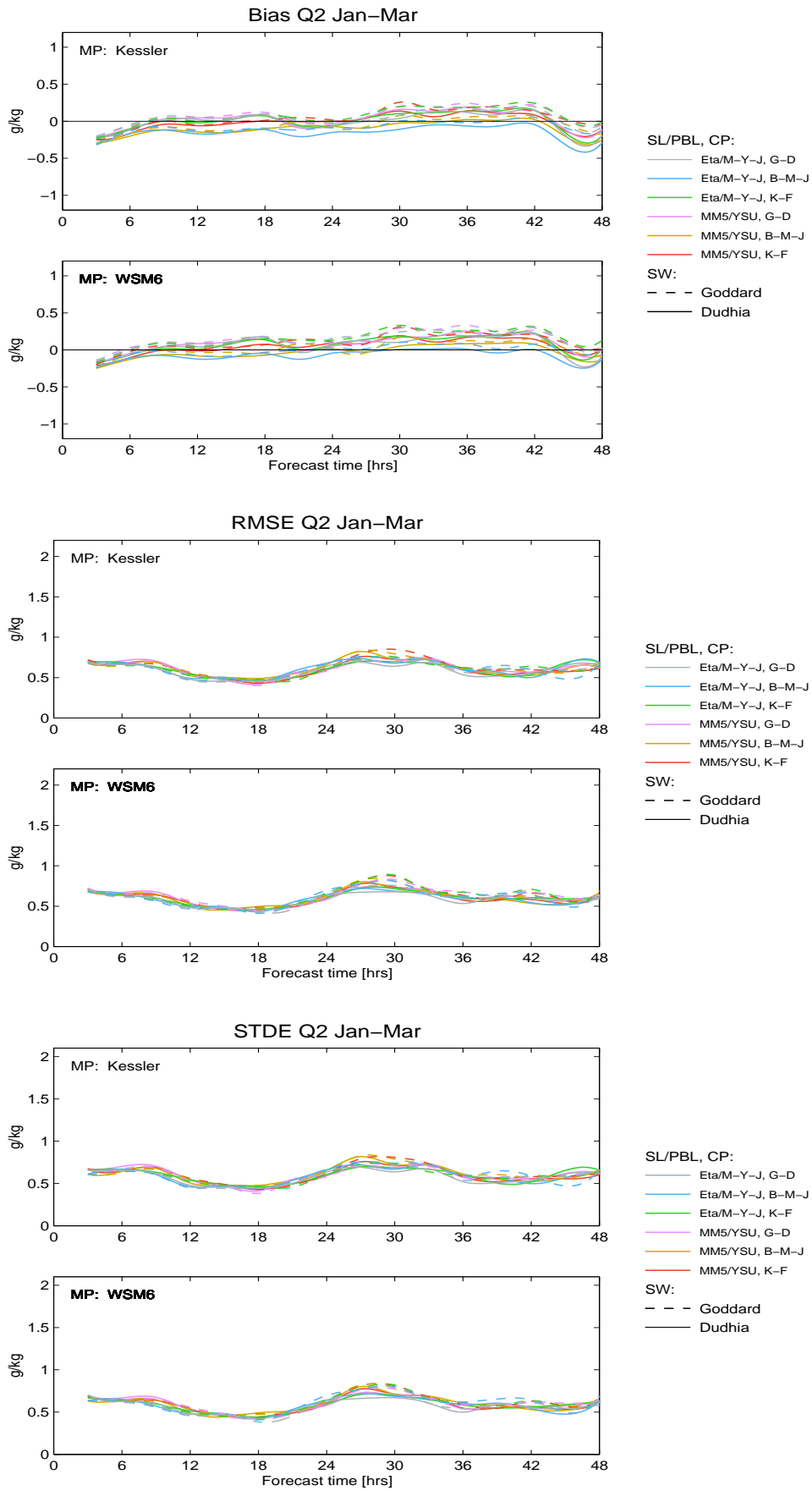


Fig. 3a Erros das previsões da razão de mistura a 2 m: Janeiro-Março

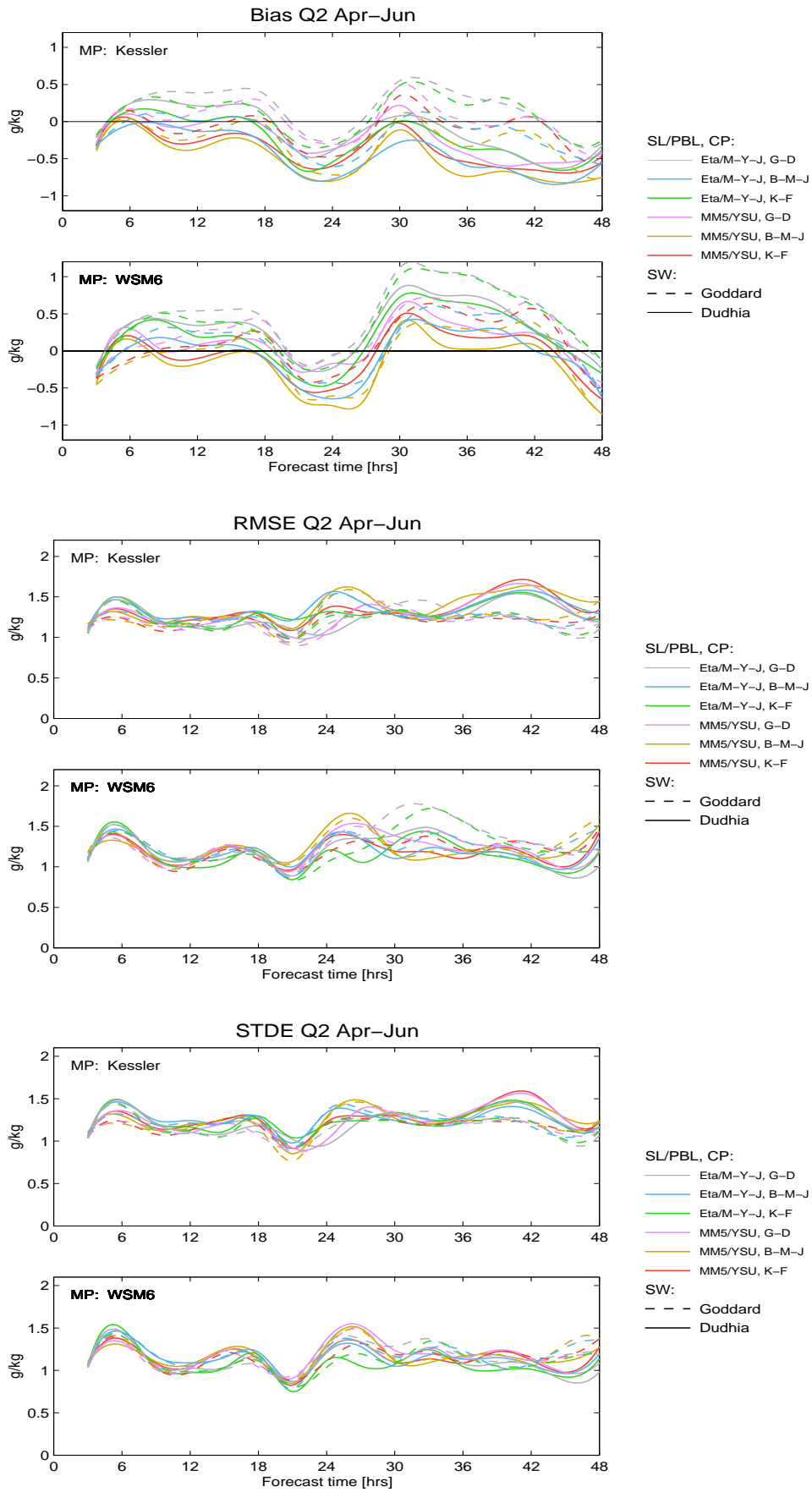


Fig. 3b Erros das previsões da razão de mistura a 2 m: Abril-Junho

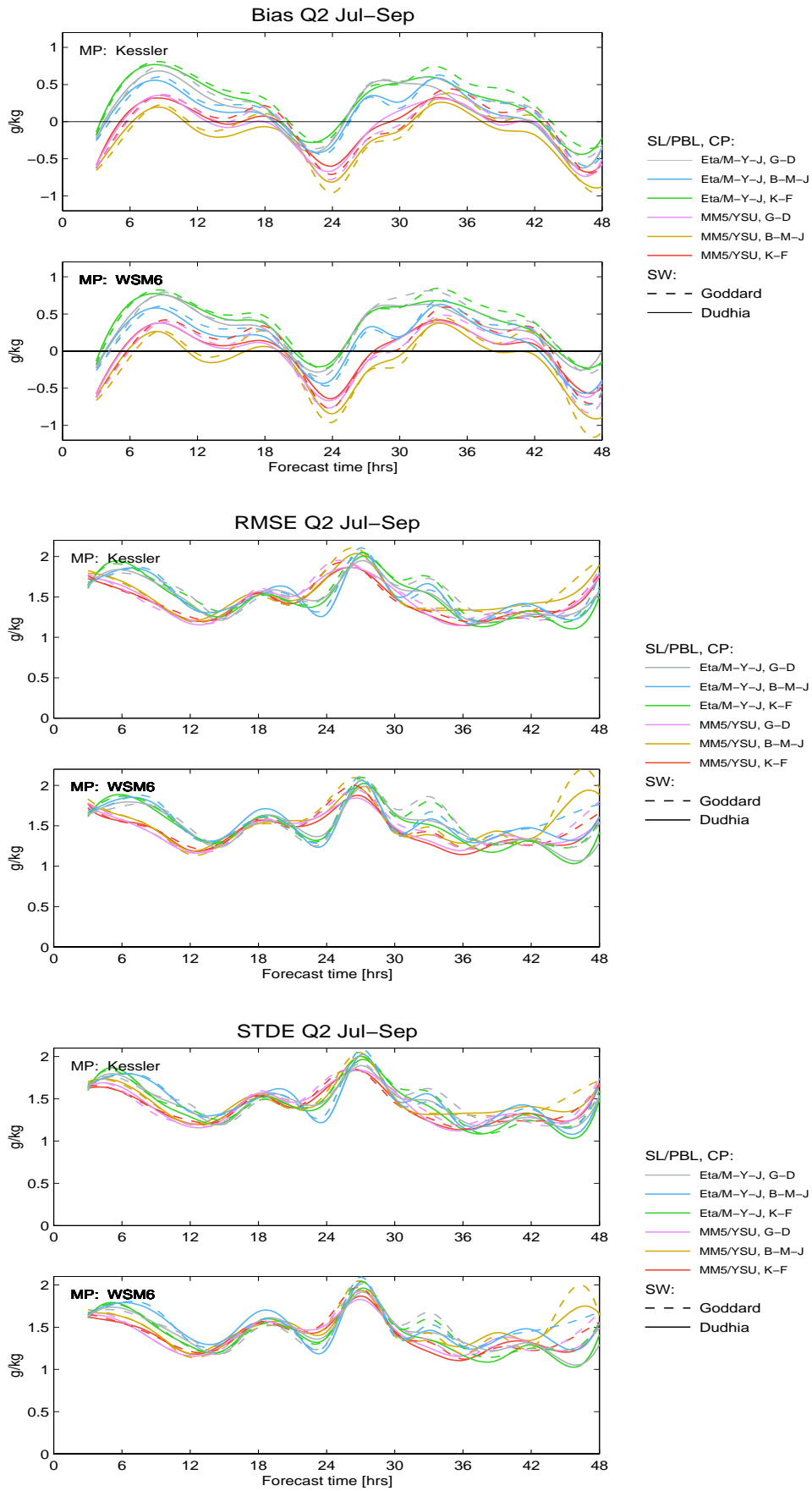


Fig. 3c Erros das previsões da razão de mistura a 2 m: Julho-Setembro

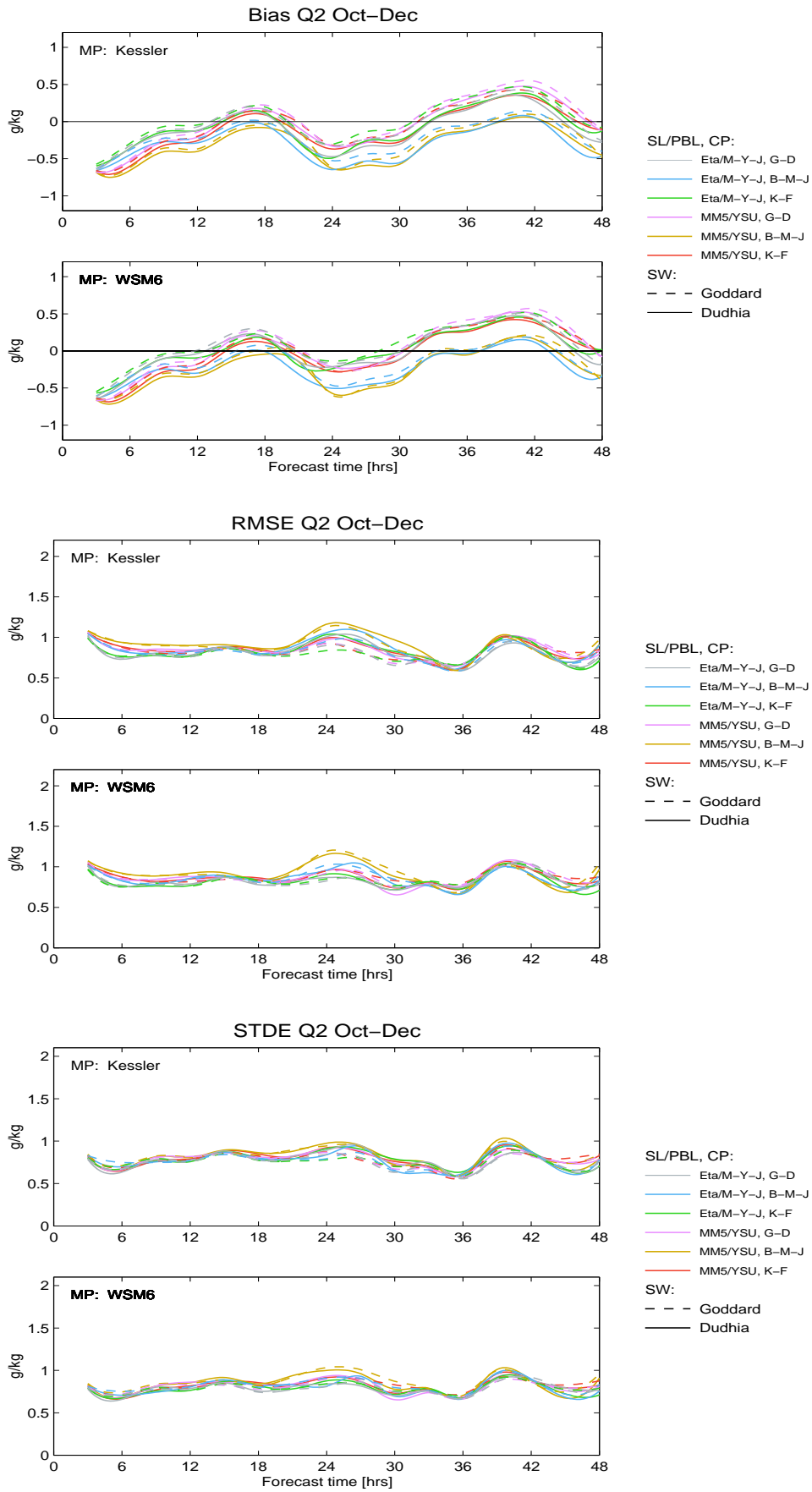


Fig. 3d Erros das previsões da razão de mistura a 2 m: Outubro-Dezembro

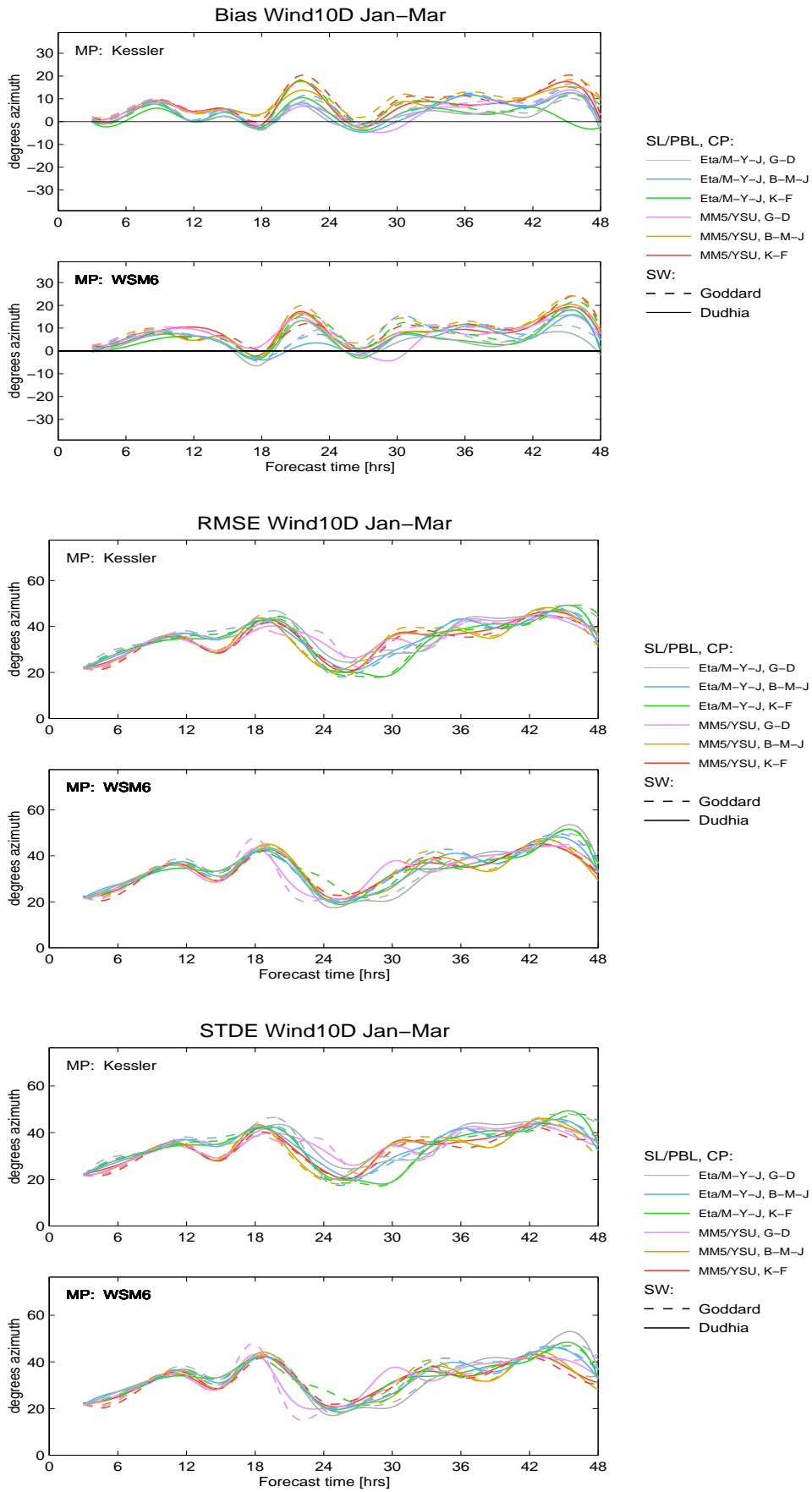


Fig. 4a Erros das previsões do rumo do vento a 10 m: Janeiro-Março

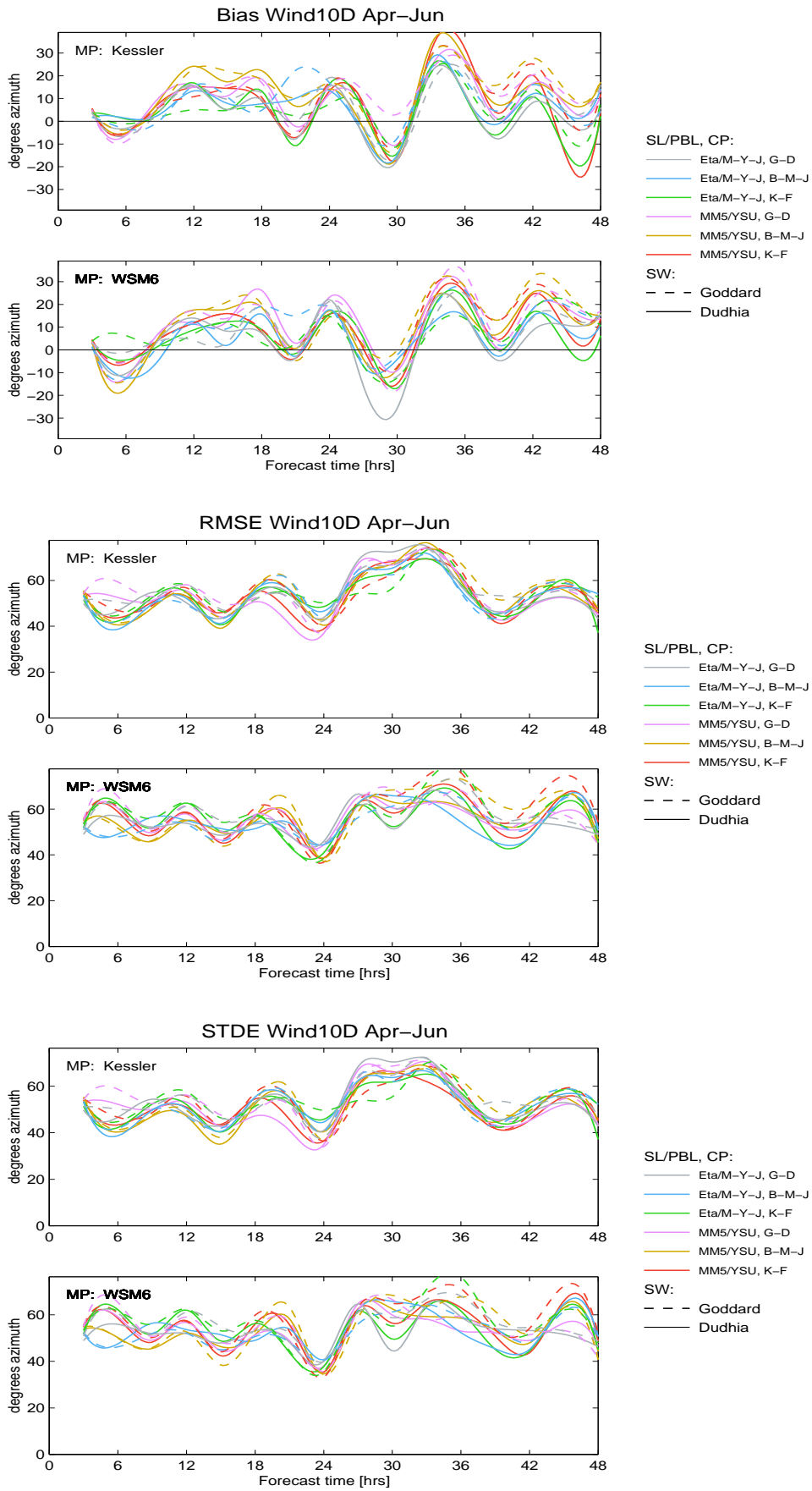


Fig. 4b Erros das previsões do rumo do vento a 10 m: Abril-Junho

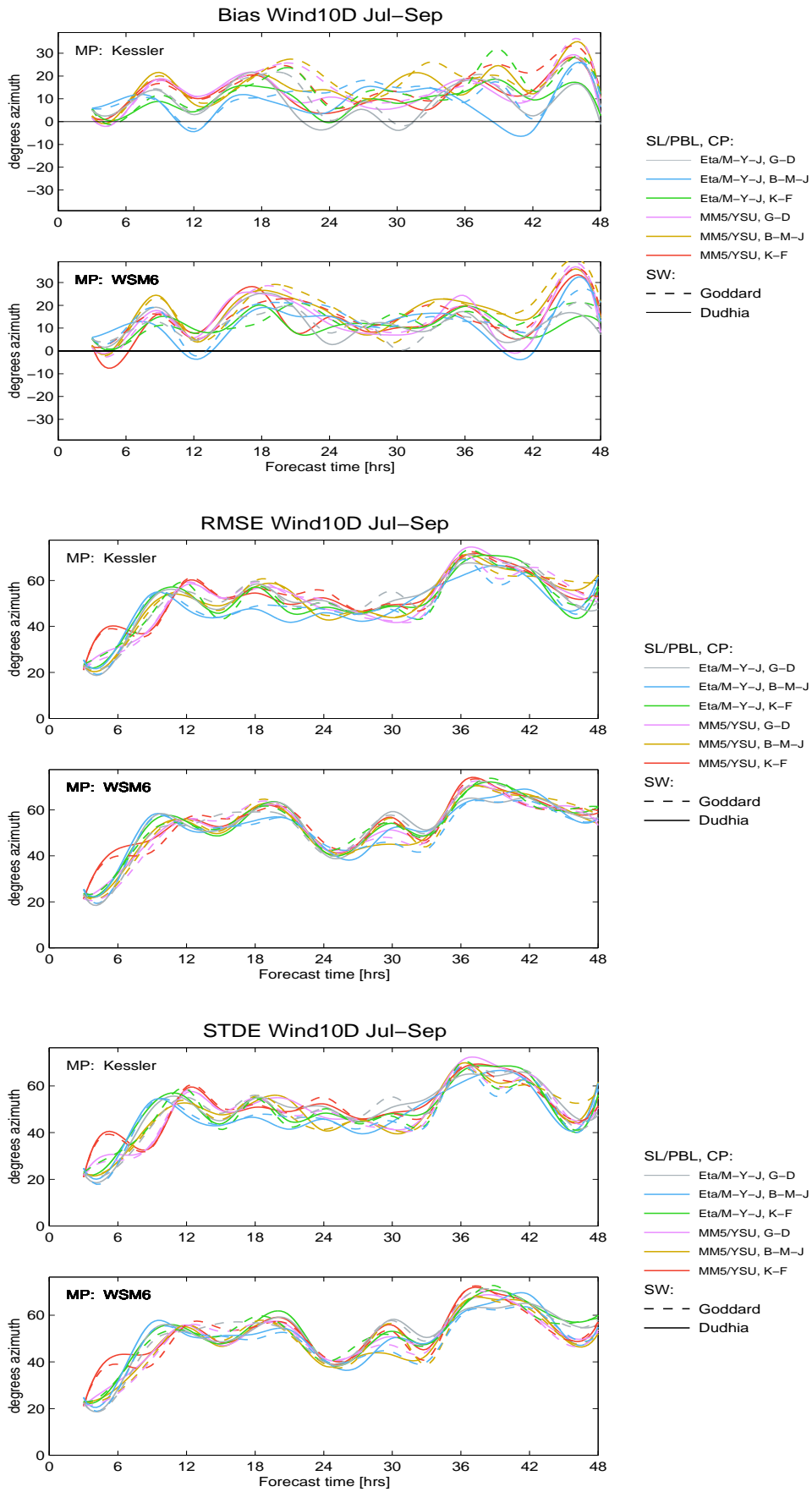


Fig. 4c Erros das previsões do rumo do vento a 10 m: Julho-Setembro

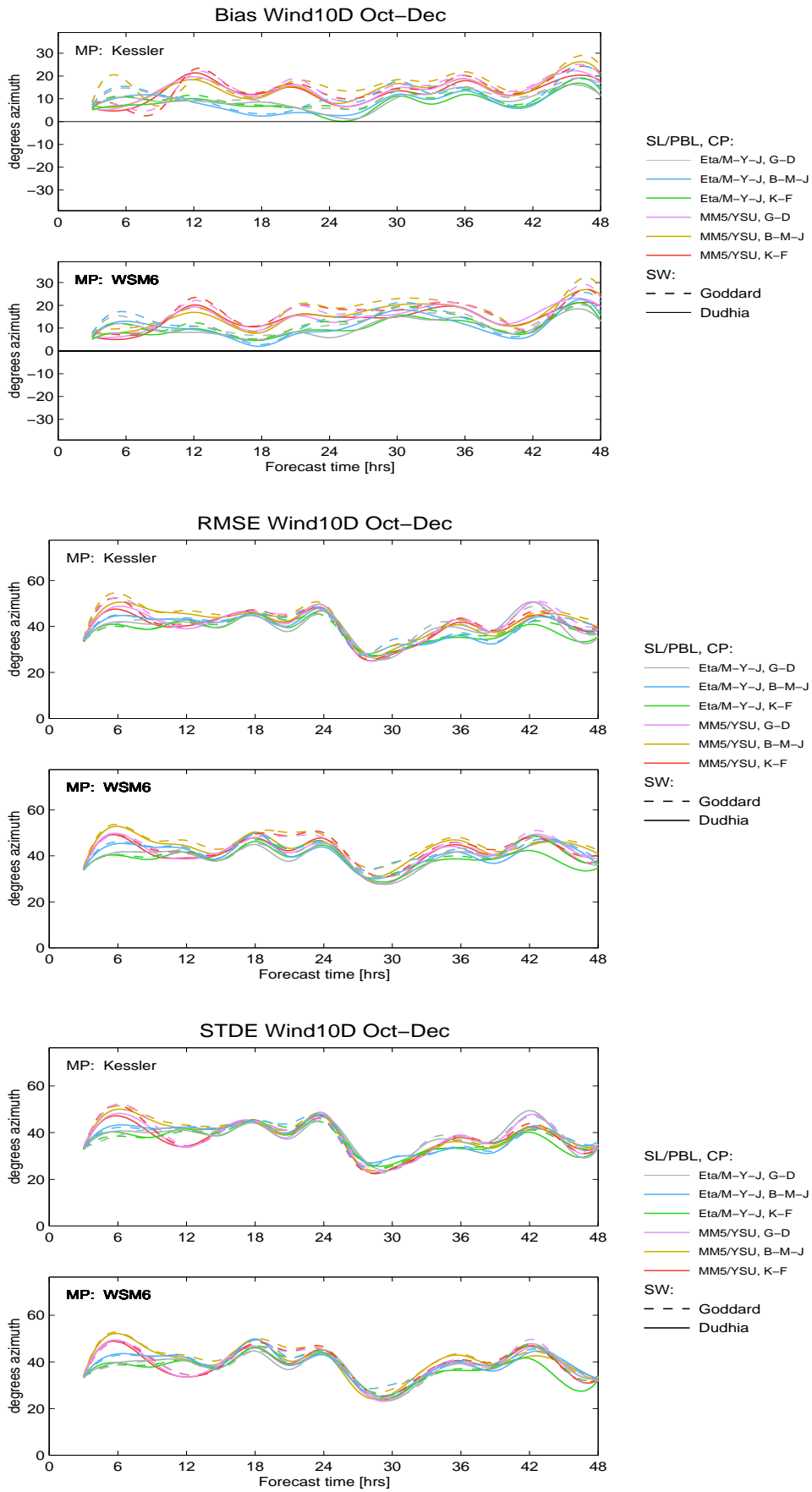


Fig. 4d Erros das previsões do rumo do vento a 10 m: Outubro-Dezembro

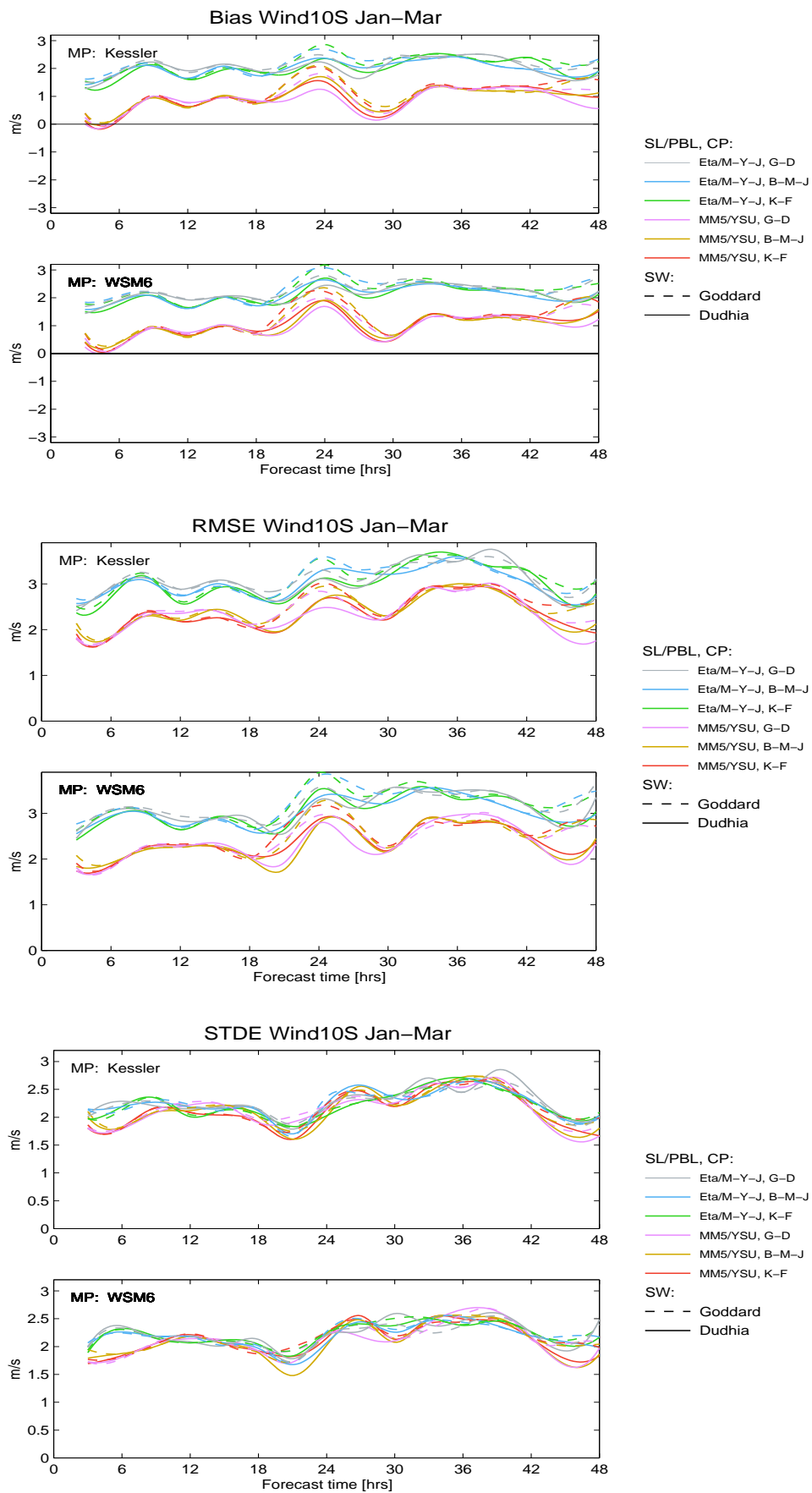


Fig. 5a Erros das previsões da intensidade do vento a 10 m: Janeiro-Março

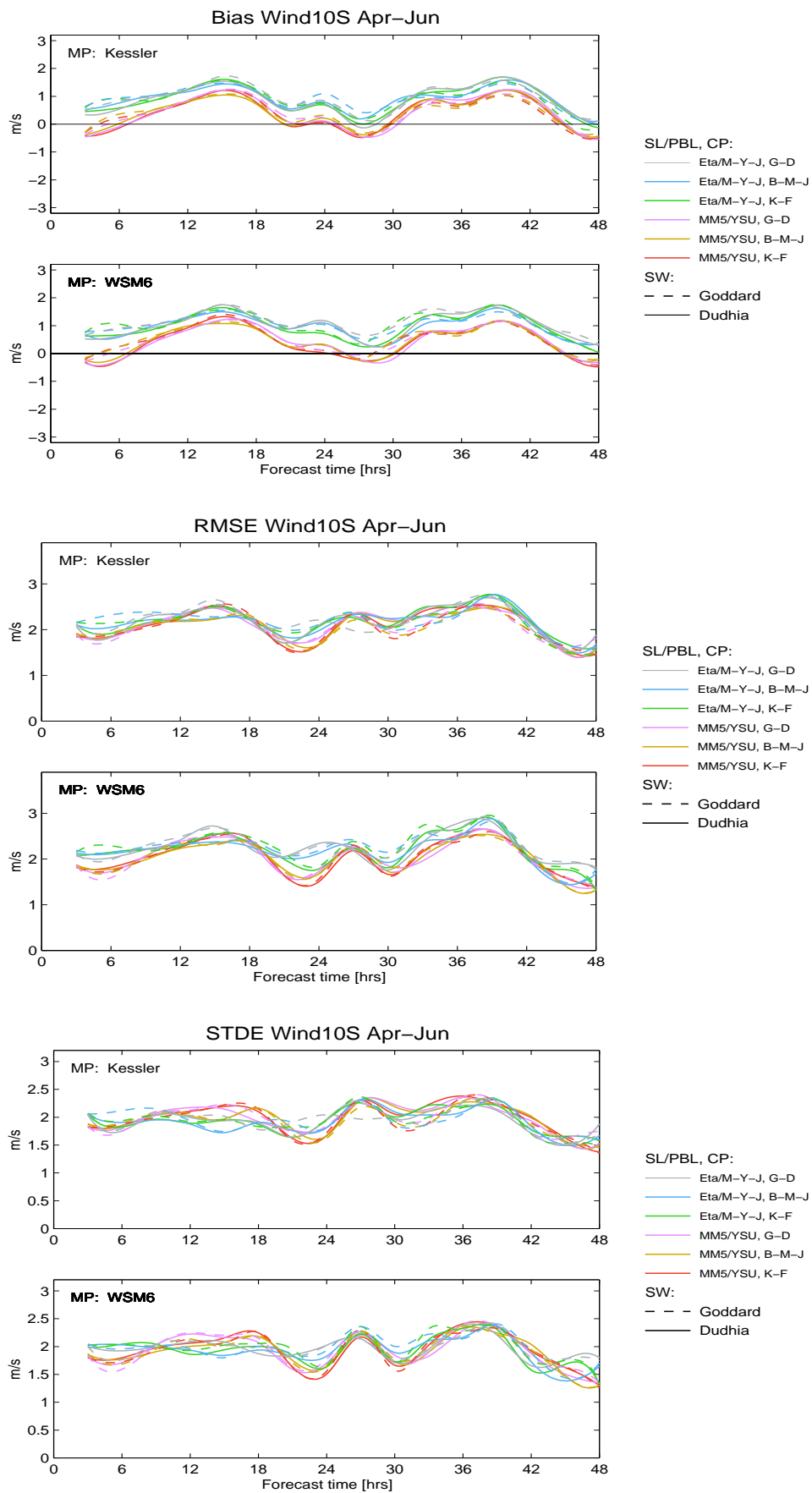


Fig. 5b Erros das previsões da intensidade do vento a 10 m: Abril-Junho

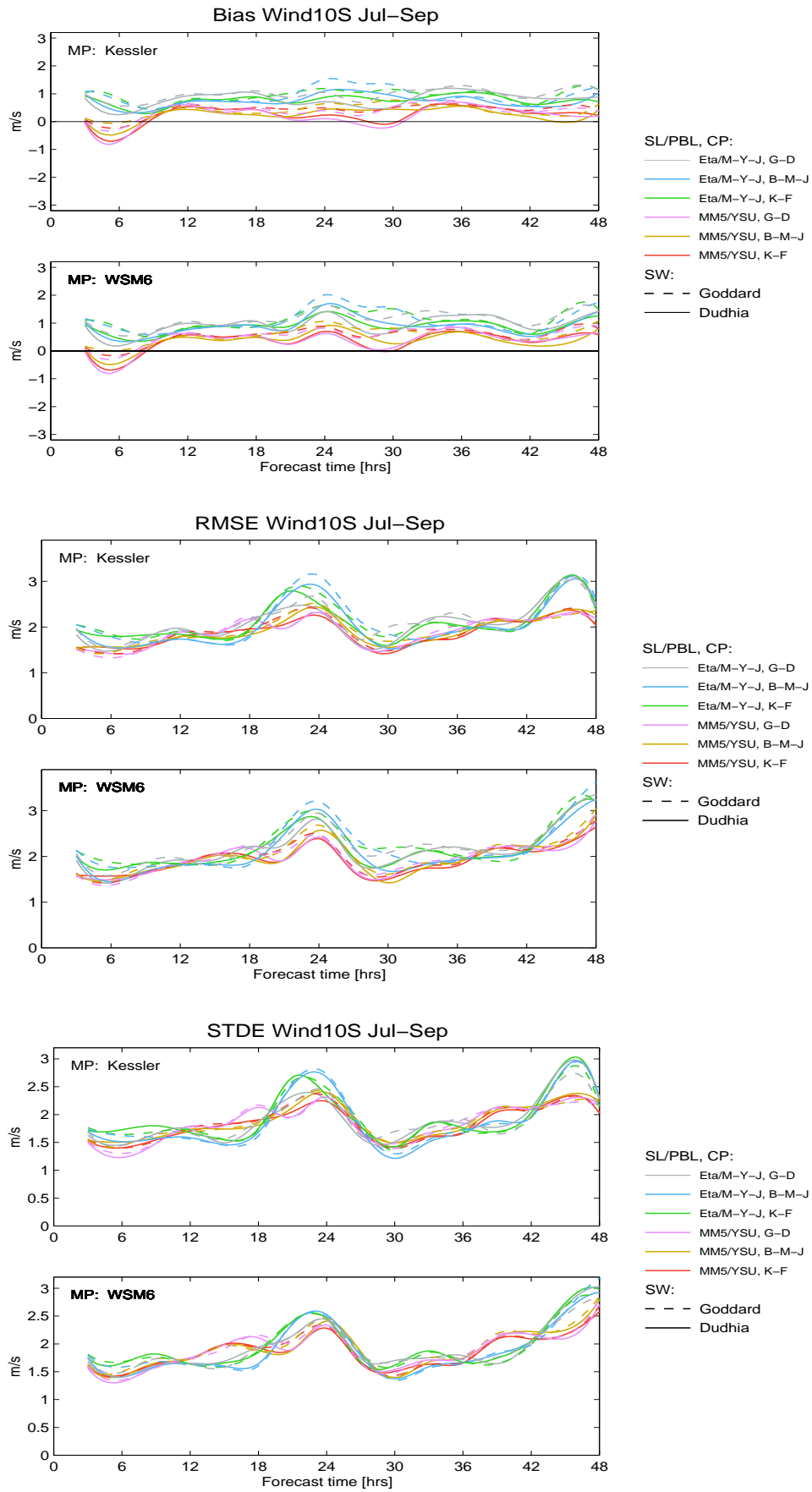


Fig. 5c Erros das previsões da intensidade do vento a 10 m: Julho-Setembro

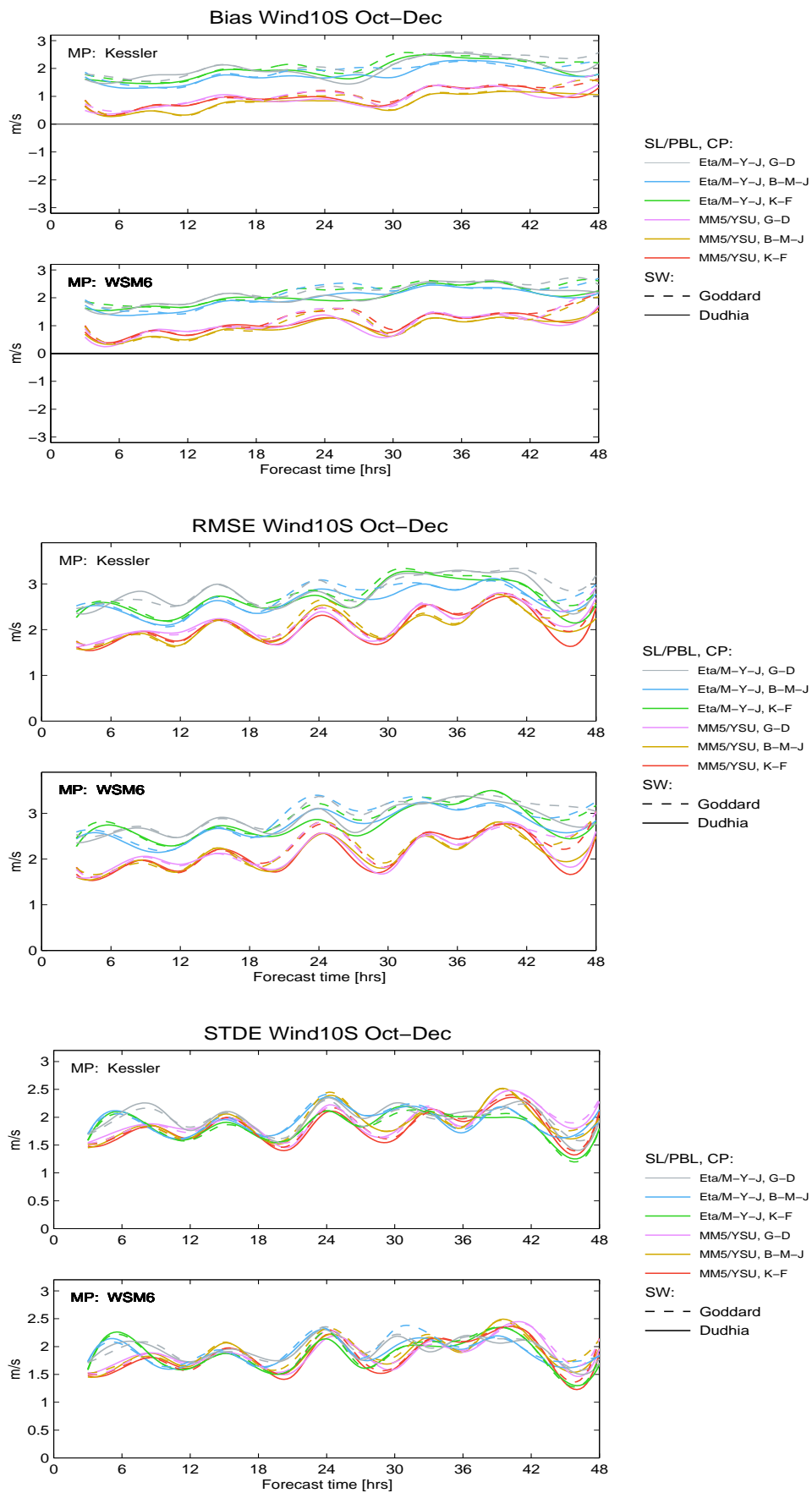


Fig. 5d Erros das previsões da intensidade do vento a 10 m: Outubro-Dezembro

Referências

Bohren, C. F., Albrecht, B. A., 1998: *Atmospheric thermodynamics*. Oxford University Press.

Dudhia, J., 2005: The Weather Research and Forecast model version 2.0: Physics update. *WRF/MM5 User's Workshop – Jun 2005*; [Disponível em <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/>]

Dudhia, J., 2007: The Weather Research and Forecasting Model: 2007 annual update [Disponível em <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/>]

Gilliland, E. K., Rowe, C.: A comparison of cumulus parameterization schemes in the WRF model; [<http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/120591.pdf>]

Murphy. A. H., Brown. B. G., Chen, Y-S., 1989: Diagnostic verification of temperature forecasts. *Wea. Forecasting*, **4**, 485-501.

NCAR/TN-468+STR, 2005: *A description of the Advanced Research WRF Version 2*. Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research , Boulder, Colorado, U.S.A., Jun. 2006; [Disponível em <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>]

Pielke, Sr., R. A., 2002: *Mesoscale meteorological modeling*. Academic Press.

Skamarock, W., 2005: Why is there more than one dynamical core in WRF? A technical perspective; [http://www.mmm.ucar.edu/people/skamarock/one_core_2005.pdf]

Smirnova. T, Brown J., Benjamin, S., 2005: Evaluation of the RUC-initialized WRF for its application in the Rapid Refresh at NCEP. *WRF/MM5 User's Workshop - June 2005*; [Disponível em http://www.mmm.ucar.edu/mm5/workshop/workshop-papers_ws05.html]

WRF (ARW) Version 2 Modeling System User's Guide. Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research , Boulder, Colorado, U.S.A., Jan. 2007; [Disponível em <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>]