



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG-USP

Grupo de Micrometeorologia
Laboratório de interação ar-mar

Monografia Exame de Qualificação

Agosto 2014

**Caracterização numérica do balanço de energia na superfície
durante condições de verão na região da estação Antártica
Brasileira**

Caio Jorge Ruman

Orientadora: Profa Dra Jacyra Soares



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

Sumário

Resumo do plano inicial.....	3
1. INTRODUÇÃO.....	3
1.1 Objetivos	3
2. REGIÃO DE ESTUDO E DADOS UTILIZADOS	4
2.1 Dados utilizados	4
3. MODELO Weather Research and Forecasting (WRF)	5
3.1 Experimentos numéricos realizados com o WRF.....	6
4. RESULTADOS PRELIMINARES.....	7
4.1 Condições meteorológicas médias	7
4.2 Estimativa do balanço de energia	8
5. RESULTADOS NUMÉRICOS PRELIMINARES USANDO O WRF	9
5.1 Experimentos iniciais	9
5.2 Rodadas finais	13
6. DISCUSSÃO.....	18
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	19



Resumo do plano inicial

O conhecimento do balanço de radiação e dos fluxos verticais turbulentos de calor, massa e momento, sobre diferentes superfícies, são importantes para estudos diagnósticos e prognósticos de mudanças climáticas e monitoramento ambiental. O objetivo primeiro deste projeto é investigar numericamente o balanço de energia na superfície e, dessa forma, o desenvolvimento da camada limite planetária em condições médias de verão na região da estação Antártica Brasileira, na Ilha Rei George (62°05'S, 58°23'W). Para tanto será usado o modelo *Weather Research and Forecasting Model* (WRF) adequado às condições da Antártica. Pretende-se utilizar os dados observacionais obtidos na Estação Brasileira pelo "Projeto ETA" e pelo projeto "Meteorologia na EACF". Devido ao caráter multidisciplinar das atividades de pesquisa relacionadas ao balanço de energia na superfície, acredita-se que esse estudo trará benefícios não ao presente trabalho, mas também aos demais projetos de pesquisa em execução dentro do âmbito do "Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Antártico de Pesquisas Ambientais".

1. INTRODUÇÃO

A Antártica é a região do planeta mais preservada e uma das mais vulneráveis às mudanças ambientais globais e por isso, alterações no meio ambiente Antártico, naturais ou causados pelo homem, tem o potencial de provocar impactos biológicos e socioeconômicos que podem afetar o sistema terrestre como um todo. Por ser parte integrante e essencial do sistema ambiental global, a região Antártica não só exporta sinais climáticos, afetando o clima global, mas também importa sinais climáticos globais, sofrendo suas consequências. Por esta razão, a pesquisa científica nas regiões polares é de grande importância ambiental e econômica, pois contribui para compreensão das alterações climáticas e ambientais observadas nestas regiões.

Estudos mostram uma pronunciada perda de massa das geleiras na região da península Antártica (Simões *et al.*, 1995). Com isso há um aumento nas áreas não glaciadas e a mudança de terreno causa uma grande variação no balanço de energia devido a diferença do albedo das duas superfícies (Ruman & Soares, 2012). Por isso o estudo do balanço de energia, que será realizado neste trabalho, é de vital importância para a região, pois um aumento das áreas não glaciadas tende a acelerar o degelo devido a maior transferência de energia para a superfície quando comparado às áreas cobertas de gelo.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é a investigação numérica do balanço de energia da superfície durante condições médias de verão na região da estação Antártica Brasileira Comandante Ferraz.

Os objetivos específicos são:

- Estudar as condições meteorológicas médias da região para o verão e o mês de fevereiro, utilizando os dados de 2000-2010 do projeto "Meteorologia na EACF".



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

- Estudar o balanço de energia para a superfície, no período de 18 a 25 de fevereiro de 2012 utilizando dados coletados *in situ* do projeto ETA e estimativas dos fluxos turbulentos obtidas através da Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov (TSMO).
- Utilizar o modelo WRF adaptado as condições da região.
- Validar os resultados numéricos com os dados obtidos *in situ* para determinar as parametrizações que melhor descrevem a região estudada.
- Utilizar as parametrizações que tiveram o melhor desempenho e validar os resultados numéricos com os dados do projeto ETA.

2. REGIÃO DE ESTUDO E DADOS UTILIZADOS

A Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF, 62°05'S, 58°23'W) está situada 120 km ao norte da península Antártica (Fig. 1), na Baía do Almirantado, Ilha do Rei George, Ilhas Shetlands do Sul. O clima na região é caracterizado como sendo relativamente quente e úmido e extremamente variável devido à alta frequência de sistemas de baixa pressão que se movem para leste (Sinclair, 1994).

A EACF fica na base de um morro de 265 m, em um local protegido dos frequentes ventos de oeste por uma geleira de cerca de 707 m acima do nível do mar (Braun *et al.*, 2001). Aproximadamente 93% da ilha é permanentemente coberta por gelo (Simões *et al.*, 1999). As geleiras causam ventos do tipo foehn na região da baía do almirantado, que faz com que a região tenha menos nuvens e seja relativamente mais quente que o lado oeste da ilha (Bintanja, 1995).

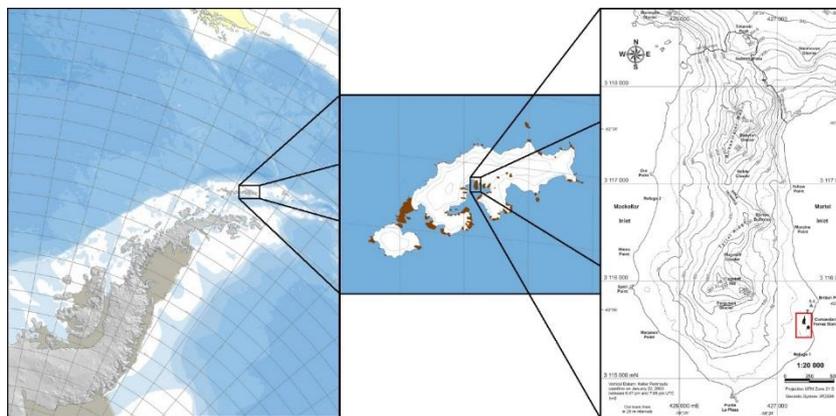


Figura 1: Localização da EACF, Ilha do Rei George com as áreas descobertas de gelo em marrom e a península Keller. O quadrado vermelho indica a EACF. Imagens de SCAR Antarctic Digital Database e Mendes e al.(2012).

2.1 Dados utilizados

Serão utilizadas duas bases de dados, a do projeto ETA, do período de fevereiro de 2012 e a do projeto “Meteorologia na EACF”, do período de 2000-2010.

2.1.1 Dados de fevereiro de 2012

Os dados das componentes do balanço de radiação na superfície, temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento em 3 níveis de altura utilizados nesse trabalho foram obtidos *in situ* entre 18 e 25 de fevereiro de 2012, pelo projeto ETA. Os sensores utilizados estão descritos na tabela 1.



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

Tabela 1: Descrição dos sensores utilizados no estudo.

Sensor	Modelo	Variável	Altura (m)
Termistor e transdutor capacitivo (Vaisala)	CS215	Temperatura e umidade relativa do ar	1.85
			6.45
			10.16
Anemômetro (RM Young)	05103	Direção e velocidade do vento	2.25
			3.31
			10.56
Fluxímetro (Hukseflux)	HFP01	Fluxo de calor no solo	-0.05
Termistor (Campbell)	107	Temperatura do solo	-0.05
Saldo Radiômetro e unidade de ventilação (Kipp-Zonen)	CNR4 e CNF4	Componentes do balanço de radiação e saldo de radiação.	3.4

As observações foram obtidas a uma frequência de 0.2 Hz e armazenadas como médias de 5 minutos. Mais detalhes dos equipamentos utilizados podem ser encontrados em Codato et al. (2013).

2.1.2 Dados de 2000-2010

Para as condições médias de temperatura do ar, umidade do ar, velocidade e direção do vento foi usada a série temporal do período de 2000-2010 disponível na Internet no endereço: <http://antartica.cptec.inpe.br>. Os dados foram coletados a 20 m acima do nível do mar e estavam disponíveis como médias horárias.

3. MODELO Weather Research and Forecasting (WRF)

O WRF é um modelo de domínio público e está disponível gratuitamente para uso da comunidade. Ele é projetado para ser o estado da arte da simulação numérica atmosférica e é portátil e eficiente nas plataformas de computação paralela. O WRF é adequado para utilização numa vasta gama de aplicações em escalas espaciais que vão de metros a milhares de quilômetros (<http://wrf-model.org/index.php>).

Basicamente, as equações do WRF são formuladas usando coordenada vertical de pressão hidrostática seguindo o terreno (η) e utiliza as equações de Euler em forma de fluxo. O modelo resolve a forma perturbada dessas equações, onde as forçantes incluem os termos de Coriolis, termos de mistura e parametrizações físicas. O topo do modelo é uma superfície de pressão constante e ele utiliza como grade horizontal a grade "C" de Arakawa deslocada.

As equações sem adição de umidade e sem estar no estado perturbado são:

$$\partial_t U + (\nabla \cdot \mathbf{V}u) - \partial_x(p\varphi_\eta) + \partial_\eta(p\varphi_x) = F_U \quad (1)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot \mathbf{V}v) - \partial_y(p\varphi_\eta) + \partial_\eta(p\varphi_y) = F_V \quad (2)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot \mathbf{V}w) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W \quad (3)$$



$$\partial_t \theta + (\nabla \cdot \mathbf{V} \theta) = F_\theta \quad (4)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot \mathbf{V}) = 0 \quad (5)$$

$$\partial_t \varphi + \mu^{-1} [(\nabla \cdot \mathbf{V} \varphi) - gW] = 0 \quad (6)$$

E a relação diagnóstica do inverso da densidade e a equação de estado:

$$\partial_\eta \varphi = -\alpha \mu \quad (7)$$

$$p = p_0 \left(R_d \theta / p_0 \alpha \right)^\gamma \quad (8)$$

Sendo $\mu = p_{hs} - p_{ht}$, onde p_{hs} e p_{ht} são as componentes hidrostáticas da pressão na superfície e no topo da atmosfera, respectivamente. ∂_k representa a derivada parcial em relação a k , $\mathbf{V} = \mathbf{v}\mu = (U, V, W)$, com $\mathbf{v} = (u, v, w)$ sendo a covariância da velocidade nas duas direções horizontais e na vertical, θ a temperatura potencial, $\theta = \mu\theta$, φ o geopotencial, p a pressão e $\alpha = 1/\rho$. Mais detalhes podem ser encontrados em Skamarock *et al.* (2008).

Neste trabalho foram utilizadas duas variações do modelo WRF: a polar (PWRF) e não polar (WRF), ambas na versão 3.5.1. A principal diferença é que a versão polar utiliza novo ponto de congelamento para a água do mar, rugosidade da superfície de 0.001 m sobre gelo marinho e gelo permanente sobre terra, emissividade da neve igual a 0.98, densidade da neve sobre gelo marinho de 300 Kg⁻³ e uso de um perfil vertical de densidade sobre gelo permanente sobre terra (Bromwich *et al.*, 2013).

Ambas versões do WRF foram compiladas e rodadas pelo autor, primeiro em um computador particular e depois em uma servidora do Grupo de Micrometeorologia do IAG-USP.

3.1 Experimentos numéricos realizados com o WRF

Foram usadas três grades aninhadas, centradas em (62°05'S, 58°23'W), conforme Figura 2a. O domínio d01 engloba o Norte da península Antártica, as ilhas Shetlands do Sul e uma parte do estreito de Drake. O domínio d02 contém a ilha do rei George junto com uma larga faixa do oceano, enquanto que o domínio d03 foi escolhido de modo que ele tenha predominantemente terra firme, no caso a ilha do rei George. A tabela 2 descreve a resolução espacial e temporal usadas.

Tabela 2: Número de pontos de grade, resolução espacial, tamanho do domínio e resolução temporal para os experimentos numéricos realizados.

	Pontos de grade	Resolução espacial	Tamanho do domínio	Resolução temporal
Grade d01	74 x 61	9 km	666 x 549 km	60 s
Grade d02	64 x 64	3 km	192 x 192 km	30 s
Grade d03	79 x 67	1 km	79 x 67 km	10 s

Foram definidos 60 níveis de altura vertical, sendo 10 deles abaixo de 800 m (Figura 2b) e topo da atmosfera a 10 hPa, com amortecimento de velocidade vertical a partir de 7.5 km de altura para aumentar a robustez do modelo nas rodadas longas.

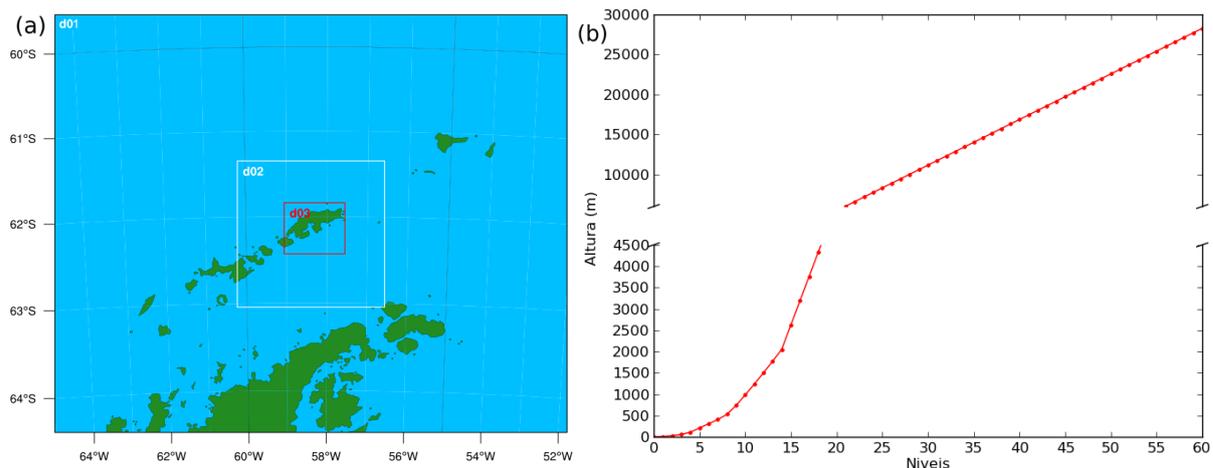


Figura 2: Configuração (a) do domínio utilizado no WRF, centrado em (62°05'S, 58°23'W), com três grades aninhadas, d01, d02 e d03 e (b) dos níveis de altura utilizados no modelo.

Inicialmente foi usado o arquivo com os dados geográficos de http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources_wps_geog.html, com resolução de 30 arc sec, aproximadamente 1 km. Para as últimas 4 rodadas iniciais e as posteriores, foi utilizada para a topografia a base de dados Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model Version 2 – RAMP DEM v2 (Liu *et al.*, 2001), com resolução de 200 m. Como o arquivo geográfico usado no modelo não contém as áreas que não há gelo, essas áreas foram incluídas manualmente no arquivo geográfico do domínio 3. Esta importante alteração só foi incluída nas rodadas que utilizaram o RAMP DEM v2.

4. RESULTADOS PRELIMINARES

4.1 Condições meteorológicas médias

Foram obtidas condições médias de verão - considerando os meses de dezembro, janeiro e fevereiro de 2000 a 2010 – da velocidade do vento, da temperatura e umidade relativa do ar (Tabela 3) e comparadas com os dados de 18 a 25 de fevereiro de 2012 com o objetivo de verificar se esses dias de fevereiro são representativos das condições médias de verão.

Tabela 3: Temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento médias e desvio padrão para o período de verão 2000-2010 e o período de 18 a 25 de fevereiro de 2012.

	Verão (DJF) – 2000-2010	18 a 25 de fevereiro de 2012
Temperatura do ar (°C)	2±2	-2±2
Umidade relativa do ar (%)	89±8	74±10
Velocidade do vento (ms⁻¹)	6±4	5±4

Baseado na Tabela 3 é possível concluir que o período estudado no mês de fevereiro é representativo das condições médias de verão na região estudada.



4.2 Estimativa do balanço de energia

Neste trabalho foi adotada a convenção que os fluxos do balanço de energia, ou seja, os fluxos de calor sensível (H), calor latente (LE), calor no solo (G) e de radiação líquida (Rn) são positivos quando orientados no sentido positivo da coordenada vertical z (Stull, 1989). A equação do balanço de energia em uma superfície ideal pode ser escrita como:

$$Rn = G - (H + LE) \quad (9)$$

Os fluxos de H e LE foram estimados através das seguintes expressões:

$$H = -\rho c_p u_* \theta_* \quad (10)$$

$$LE = -\rho L u_* q_* \quad (11)$$

Sendo ρ a densidade do ar, c_p o calor específico a pressão constante, L o calor latente de vaporização. A escala característica da velocidade do vento (u_*), a escala característica da temperatura (θ_*) e a escala característica da umidade (q_*) foram calculados seguindo a teoria de similaridade de Monin-Obukhov descrita em Wyngaard (2010). Os valores de H e LE foram estimados numericamente a cada 5 min e em seguida realizou-se uma média móvel de 1h.

A radiação líquida é a principal fonte de energia e como o verão possui dias longos devido à alta latitude, a energia disponível na superfície é alta. Nos dias nublados, a perda de energia radiativa pelo solo durante a noite é por volta de 50 Wm^{-2} , enquanto que nos dias de céu claro ela chega a 75 Wm^{-2} (Fig. 3).

O fluxo de calor no solo apresenta um fluxo negativo em torno de $25\text{-}50 \text{ Wm}^{-2}$ durante o dia e um fluxo de menos de 25 Wm^{-2} durante a noite.

Os fluxos de H e LE durante o período diurno mostram que boa parte da energia disponível (Rn) é usada para o aquecimento da atmosfera (H) e evaporação da água no solo (LE).

Devido a problemas de fechamento, temos um termo de resíduo (I), que leva em consideração os fluxos de energia não associados a fontes locais, erros sistemáticos causados por observações e limitações na metodologia (Foken, 2008), mudança de fase do gelo na superfície, solo congelado (Oliveira et al, 2012) e a heterogeneidade horizontal da região estudada. O resíduo apresenta um valor alto, especialmente no período noturno. Os melhores resultados obtidos foram nos dias 21 e 22 de fevereiro e no final do dia 24 de fevereiro, dias que não houveram nuvens significativas.

Realizando uma comparação com o trabalho de Choi *et al.*, (2008), que realizou um estudo similar em uma região não glaciada no lado oeste da ilha do Rei George utilizando o método direto, temos que para um dia com grande quantidade de energia disponível, como o período estudado neste trabalho, o valor médio de H teve amplitude de -23 à 240 Wm^{-2} e LE teve amplitude de 5 a 83 Wm^{-2} , valores menores que os estimados neste trabalho.

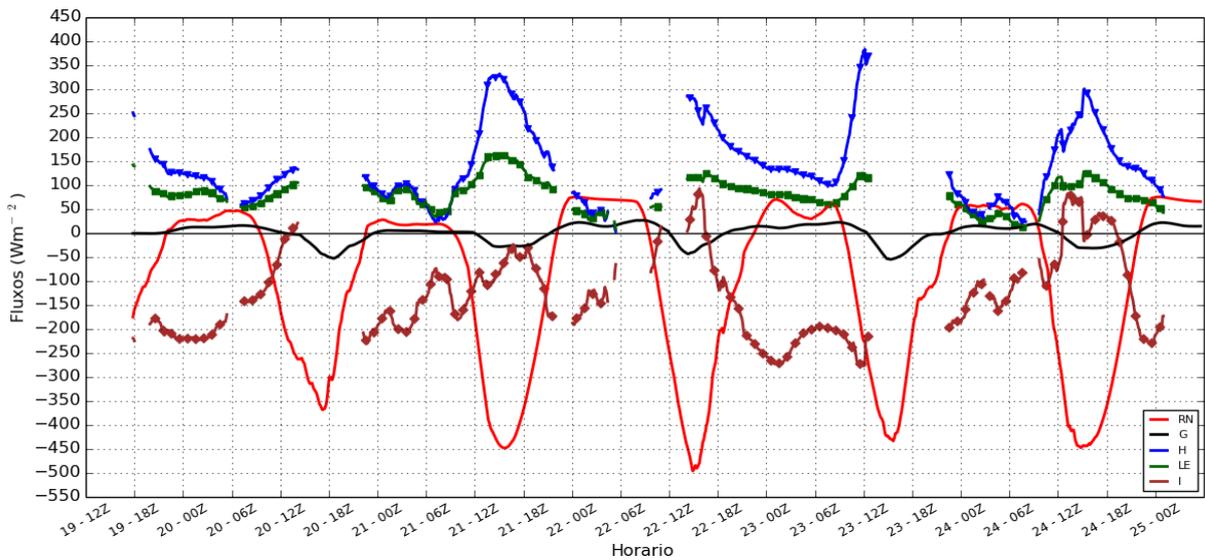


Figura 3: Componentes do balanço de energia (Wm^{-2}) para o período estudado. Os fluxos turbulentos de calor sensível e latente foram obtidos pela TSMO e os demais fluxos foram medidos diretamente.

Futuramente, com a instalação de sensores de alta frequência, H e LE serão melhor estimados pelo método da correlação (método direto).

5. RESULTADOS NUMÉRICOS PRELIMINARES USANDO O WRF

Nesta seção serão apresentados os resultados preliminares com o WRF, em que foram feitos experimentos iniciais de modo a verificar as melhores parametrizações para a região em estudo para em seguida realizar os experimentos finais para um período mais longo.

5.1 Experimentos iniciais

Para as rodadas iniciais foi escolhido o período entre 20 de fevereiro as 00Z e 23 de fevereiro as 00Z, descartando as 6h iniciais devido à instabilidade numérica inicial.

Foram utilizadas como condições iniciais e de fronteira duas bases de dados: A reanálise do National Centers for Environmental Prediction Final Analyses (NCEP FNL, 2000), com resolução de 1° e a reanálise do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), o produto ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011), com resolução de 0.75° . Ambas as reanálises possuem dados para 00, 06, 12 e 18 UTC.

Os resultados obtidos com o modelo foram validados comparando-os com os dados meteorológicos do projeto ETA. A validação foi feita utilizando métodos estatísticos, o *root mean square error* (RMSE) e *mean-bias error* (MBE), que são definidos como:

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^2 \right)^{1/2} \quad (12)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad (13)$$

Onde N é o número total de valores e d_i a diferença entre o valor observado e o valor estimado pelo modelo. O MBE provê informação do desempenho de longo prazo do modelo. Um valor positivo no MBE nos mostra o quanto o valor calculado foi superestimado e vice-



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

versa. O teste RMSE provê informação do desempenho de curto prazo do modelo, pois ele permite uma comparação termo a termo do desvio real entre o valor medido *in situ* e o valor calculado pelo modelo (Halouani *et al.*, 1993). Cada teste separadamente pode não ser um indicador do desempenho do modelo porque é possível ter um valor alto do RMSE e ao mesmo tempo, um valor baixo de MBE ou vice-versa (Targino *et al.*, 2002).

Inicialmente usou-se os arquivos de configuração do WRF utilizados pelo Antarctic Mesoscale Prediction System (AMPS, <http://www.mmm.ucar.edu/rt/amps/information/information.html>). A partir dessa configuração inicial, foram efetuadas mudanças de acordo com o estudo.

Diferentes parametrizações de microfísica, radiação de onda curta (OC), radiação de onda longa (OL), camada limite superficial (CLS), camada limite planetária (CLP), superfície terrestre e cumulus foram testadas (Seefeldt *et al.*, 2012, Bromwich *et al.*, 2013, e Kilpelainen *et al.*, 2012) com o intuito de melhor representar os processos típicos da região de estudo.

Foram utilizados sete esquemas de microfísica:

- Lin *et al.*: Um esquema sofisticado que possui processos de gelo, neve e graupel (precipitação de neve que cai na forma de pequenos esferoides de gelo), adequado para processos de alta resolução.
- *WRF Single-moment 5-class scheme (WSM5)*: Um esquema simples e eficiente que lida com processos de gelo, neve, água super resfriada e água em múltiplos estados (mixed-phase).
- *WRF Single-moment 6-class scheme*: Um esquema com processos de gelo, neve e graupel, adequado para simulações em alta resolução. Os nomes WSM3, WSM5 e WSM6 denotam o número de categorias de tipos de água que o esquema prediz, incluindo vapor d'água.
- Goddard microphysics scheme: Um esquema com processos de gelo, neve e graupel, adequado para simulações em alta resolução.
- New Thompson *et al.* Scheme: Um esquema com processos de gelo, neve e graupel, adequado para simulações em alta resolução, que inclui o número de concentração de chuva.
- Milbrandt-Yau Double Moment 7-class scheme (MYDM): Este esquema inclui categorias separadas para granizo e graupel com momento duplo para nuvens, chuva, gelo, neve, graupel e granizo.

Para as parametrizações de radiação, foram efetuados testes com os esquemas NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0) e Rapid Radiative Transfer Model for GCM (RRTMG) para OL e os esquemas CAM, Goddard e RRTMG para OC. Foram usadas as combinações dos esquemas CAM-CAM, RRTMG-Goddard e RRTMG-RRTMG. A documentação aconselha a utilização dos mesmos esquemas para OL e OC para um melhor resultado, porém a combinação RRTMG-Goddard foi usada devido ao seu uso no AMPS.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

Os esquemas da camada limite superficial e camada limite planetária dependem um do outro e desse modo a documentação também aconselha que os mesmos sejam usados em conjunto. Foi usado o esquema de similaridade ETA - esquema Mellor-Yamada-Janjic (MYJ).

O esquema de similaridade ETA é baseado na teoria de similaridade (Monin e Obukhov, 1954), com parametrizações de subcamada viscosa sobre a água baseada em Janjic (1994) e sobre a terra a viscosidade é levado em conta através da altura da rugosidade variável para temperatura e umidade como proposto por Zilitinkevich (1995). O esquema para camada limite planetária MYJ faz a parametrização de turbulência de modo a representar uma implementação não singular do modelo de fechamento turbulento de ordem 2.5 de Mellor-Yamada. (Wang et al., 2013).

Para a superfície terrestre foram comparados o modelo de superfície terrestre NOAH e o Rapid Update Cycle (RUC). O esquema NOAH possui quatro camadas de temperatura e umidade do solo, com previsão de cobertura de neve fracional e temperatura do solo congelado e o esquema RUC possui seis camadas de temperatura e umidade do solo, com neve de múltiplas camadas e física de solo congelado. A principal diferença entre os dois esquemas é que no NOAH o albedo é em função do ângulo zenital solar e profundidade da neve enquanto no RUC possui um albedo fixo para a neve (Kilpeläinen *et al*, 2012).

Para o esquema de parametrização de cumulus foi usado o esquema Kain-Fritsch para a grade d01 e d02, deixando que os vórtices menores sejam resolvidos pelos outros esquemas na grade d03.

Os resultados numéricos foram validados estatisticamente (Tabelas 4 e 5) comparando os valores de temperatura do ar a 2m (T), onda longa incidente na superfície emitida pela atmosfera (OL_{\downarrow}), saldo de onda curta (OC_{NET}), temperatura do solo a 5cm de profundidade (T_{SOLO}), pressão na superfície (P), intensidade do vento a 10m ($|\vec{V}|$), umidade específica a 2m (q), fluxo de calor latente na superfície (LE) e fluxo de calor sensível na superfície (H). Os valores de T , OL_{\downarrow} , OC_{NET} , P , T_{SOLO} , $|\vec{V}|$ e q foram comparados diretamente com os dados obtidos *in situ* pelo projeto ETA. Os valores de LE e H foram comparados com os dados estimados através das expressões (2) e (3), da seção 4.2.

Primeiramente foram efetuadas 14 rodadas comparando os esquemas de microfísica com os esquemas de radiação. Os esquemas de microfísica com os melhores resultados, WSM5, WSM6 e MYDM foram selecionados para mais 10 rodadas, comparando os esquemas de superfície terrestre, camada limite planetária e camada de superfície.

Desse modo foram escolhidas duas parametrizações de microfísica (MYDM e WSM6), um conjunto de parametrizações de radiação (RRTMG-RRTMG), duas parametrizações de superfície do solo (RUC e Noah) e um conjunto de parametrização de camada limite planetária e camada de limite superficial (MYJ), totalizando quatro combinações de parametrizações.

Essas quatro combinações foram rodadas novamente utilizando como condição inicial os dados do ERA-Interim. Após a comparação estatística dos resultados, foram escolhidas duas



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

combinações de parametrizações para os demais testes: WSM6 e MYDM para microfísica; RRTMG-RRTMG para a radiação; RUC para superfície do solo e MYJ para a camada limite superficial, denominadas configurações 1 (MYDM) e 2 (WSM6). A base de dado do NCEP/FNL não foi mais utilizada como condição inicial, devido à superioridade dos resultados obtidos com o ERA-Interim.

Com as configurações definidas, foram efetuados testes utilizando o PWRf e a modificação no arquivo geográfico, incluindo áreas sem cobertura de gelo.

Na comparação dos resultados obtidos com as rodadas iniciais fica clara a superioridade da base de dados ERA-Interim em relação ao NCEP/FNL, demonstrando a sensibilidade do modelo às condições iniciais. Nota-se também a melhora nos resultados devido a inclusão das áreas sem cobertura de gelo, com melhoras em quase todos os valores de RMSE e MBE. Comparando as rodadas do WRF com o PWRf, nota-se que a diferença entre as duas versões dos modelos é pequena, sendo o PWRf superior em relação à $OL\downarrow$, OC_{NET} , T_{SOLO} e LE.

Tabela 4: Valores de RMSE para T, $OL\downarrow$, OC_{NET} , Pressão, T_{SOLO} , $|\vec{V}|$, q, H e LE

Rodadas	T(°C)	$OL\downarrow$ (Wm^{-2})	OC_{NET} (Wm^{-2})	Pressão (hPa)	T_{SOLO} (°C)	$ \vec{V} $ (ms^{-1})	q ($g\ kg^{-1}$)	H (Wm^{-2})	LE (Wm^{-2})
WRF – NCEP/FNL – 1	2.53	48.2	209.2	0.83	8.88	3.41	0.48	176.4	86.6
WRF – NCEP/FNL – 2	2.59	43.7	204.8	0.84	8.77	3.43	0.46	175.6	86.4
WRF – ERA – 1	1.70	51.8	143.0	1.42	6.08	1.67	0.43	135.7	92.2
WRF – ERA – 2	2.02	50.9	151.7	1.45	6.43	1.66	0.60	154.1	79.7
PWRf – NCEP/FNL – 1	2.55	48.0	210.2	0.82	8.77	3.34	0.46	171.9	86.6
PWRf – NCEP/FNL – 2	2.63	42.4	205.0	0.83	8.61	3.47	0.46	171.2	87.3
PWRf – ERA – 1	1.75	51.6	162.8	1.37	6.11	1.64	0.40	133.2	98.6
PWRf – ERA – 2	1.81	49.4	161.2	1.38	6.07	1.81	0.71	130.8	77.7
PWRf – ERA – Terreno – 1	1.70	48.0	87.6	0.75	4.21	1.60	0.53	111.3	84.9
PWRf – ERA – Terreno – 2	1.46	49.6	89.5	1.38	5.22	1.64	0.84	106.2	156.8
WRF – ERA – Terreno – 1	1.48	51.6	96.3	0.76	5.50	1.58	0.43	108.1	103.6
WRF – ERA – Terreno – 2	1.41	48.8	90.8	0.65	5.39	1.63	0.74	97.6	155.1

Com os resultados obtidos nas rodadas iniciais, foram obtidas duas boas configurações para continuar o estudo utilizando as rodadas finais.



Tabela 5: Valores de MBE para T, OL↓, OC_{NET}, Pressão, T_{SOLO}, $|\vec{V}|$, q, H e LE

Rodadas	T(°C)	OL↓ (Wm ⁻²)	OC _{NET} (Wm ⁻²)	Pressão (hPa)	T _{SOLO} (°C)	$ \vec{V} $ (ms ⁻¹)	q (g kg ⁻¹)	H (Wm ⁻²)	LE (Wm ⁻²)
WRF – NCEP/FNL – 1	-1.88	-31.3	152.9	0.40	-8.73	1.14	0.01	-151.8	-74.7
WRF – NCEP/FNL – 2	-1.96	-33.0	150.6	0.43	-8.64	1.25	0.04	-151.2	-73.0
WRF – ERA – 1	-1.27	-45.9	86.0	1.34	-3.78	0.62	-0.21	-106.6	-80.6
WRF – ERA – 2	-1.72	-45.2	94.8	1.38	-5.28	0.59	0.11	-128.5	-61.1
PWRF – NCEP/FNL – 1	-1.95	-31.3	153.5	0.41	-8.63	1.08	0.01	-149.2	-74.5
PWRF – NCEP/FNL – 2	-2.03	-32.5	150.4	0.44	-8.48	1.07	0.04	-148.4	-73.5
PWRF – ERA – 1	-1.27	-45.1	105.7	1.30	-4.09	0.70	-0.25	-109.5	-85.7
PWRF – ERA – 2	-1.36	-43.4	103.3	1.30	-4.05	0.76	0.22	-105.8	-38.6
PWRF – ERA – Terreno – 1	-1.31	-38.5	-9.0	0.60	-3.36	-0.22	0.11	-75.8	-11.3
PWRF – ERA – Terreno – 2	-0.70	-43.2	-25.5	1.29	-2.00	0.66	0.31	-29.1	34.7
WRF – ERA – Terreno – 1	-0.48	-45.5	-29.2	0.58	-1.79	0.54	-0.19	-15.6	-77.9
WRF – ERA – Terreno – 2	-0.52	-41.8	-14.3	0.44	-2.98	0.64	0.24	-35.5	14.1

5.2 Experimentos finais

Com as duas parametrizações escolhidas nas rodadas iniciais, foram efetuadas 4 rodadas finais com 9 dias de duração, de 16 de fevereiro as 00Z à 25 de fevereiro as 00Z, duas rodadas com o WRF e duas rodadas com o PWRF. Em todas as rodadas foi utilizado o ERA-Interim como condição inicial e de fronteira, o arquivo topográfico do RAMP DEM v2 e foi feita a modificação no arquivo geográfico, para adicionar as regiões sem cobertura de gelo. Os dois primeiros dias foram eliminados da comparação para suprimir erros relativos a instabilidade inicial.

O período estudado representa condições de final de verão, com a temperatura oscilando 0° e -4°C. Acontecimentos de nota durante o período destacam-se a precipitação em forma de neve no dia 18/02 e dois períodos de céu claro, do dia 21/02 até metade do dia 22/02 e o dia 24/02.

Foram feitas comparações estatísticas, utilizando o RMSE, MBE e para as rodadas finais também foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson (Onwuegbuzie *et al.*, 2007):

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (14)$$

Onde \bar{x} e \bar{y} são as médias dos valores a serem correlacionados, x e y.

Os valores de RMSE, MBE e os coeficientes de correlação são mostrados na Tabela 6. O modelo representou bem a pressão atmosférica (Fig. 4), temperatura do ar (Fig. 5) e intensidade do vento (Fig. 6) para os dois conjuntos de parametrizações usados, com um MBE pequeno, positivo para a pressão e negativo para a T e $|\vec{V}|$, ou seja, o modelo superestima a pressão e subestima T e $|\vec{V}|$. O RMSE para essas três variáveis foi baixo e o coeficiente de correlação foi alto para pressão e $|\vec{V}|$ e um valor bom para T. Essas três variáveis foram melhor



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

representadas nos períodos sem precipitação e com poucas nuvens, uma tendência que será vista em todas as variáveis analisadas.

Tabela 6: Valores de RMSE, MBE e do coeficiente de correlação para T, $OL\downarrow$, OC_{NET} , Pressão, T_{SOLO} , $|\vec{V}|$, q e H e LE.

	RMSE				MBE				Corr			
	WRF conf. 1	WRF conf. 2	PWRF conf. 1	PWRF conf. 2	WRF conf. 1	WRF conf. 2	PWRF conf. 1	PWRF conf. 2	WRF conf. 1	WRF conf. 2	PWRF conf. 1	PWRF conf. 2
T(°C)	1.57	2.03	1.60	1.97	-0.80	-1.40	-0.76	-1.30	0.68	0.64	0.67	0.64
$OL\downarrow$ (Wm^{-2})	43.2	44.4	43.3	44.5	-29.6	-37.0	-30.1	-35.7	0.53	0.68	0.53	0.63
OC_{NET} (Wm^{-2})	100.0	164.5	104.4	148.9	-12.8	68.7	-13.5	50.3	0.87	0.67	0.86	0.71
Pressão (hPa)	0.95	0.99	0.95	1.01	0.46	0.43	0.44	0.43	0.9950	0.9945	0.9949	0.9942
T_{SOLO} (°C)	3.81	5.07	3.96	4.78	-2.78	-4.42	-2.72	-4.13	0.75	0.52	0.74	0.56
$ \vec{V} $ (ms^{-1})	2.75	2.68	2.85	2.68	-0.88	-0.94	-0.79	-1.00	0.78	0.79	0.75	0.80
q ($g\ kg^{-1}$)	0.43	0.37	0.45	0.39	0.07	0.04	0.08	0.01	0.67	0.74	0.60	0.71
H (Wm^{-2})	112.0	146.3	108.0	150.9	-77.3	-131.3	-78.8	-135.6	0.69	0.60	0.71	0.58
LE (Wm^{-2})	83.3	66.1	81.4	69.1	-22.4	-55.3	-19.9	-59.2	0.62	0.59	0.68	0.56

As rodadas utilizando a parametrização de microfísica WSM6, configuração 2, não apresentou os mesmo bons resultados apresentados nas rodadas curtas, tanto no WRF quanto no PWRF, com índices estatísticos piores quando comparado com a configuração 1 para T, OC_{NET} , T_{SOLO} , H e LE, possivelmente devido não representação adequada do modelo na transição da cobertura do solo após o período de neve, visível na Fig. 8, em que na configuração 2 a temperatura do solo é sempre abaixo de zero.

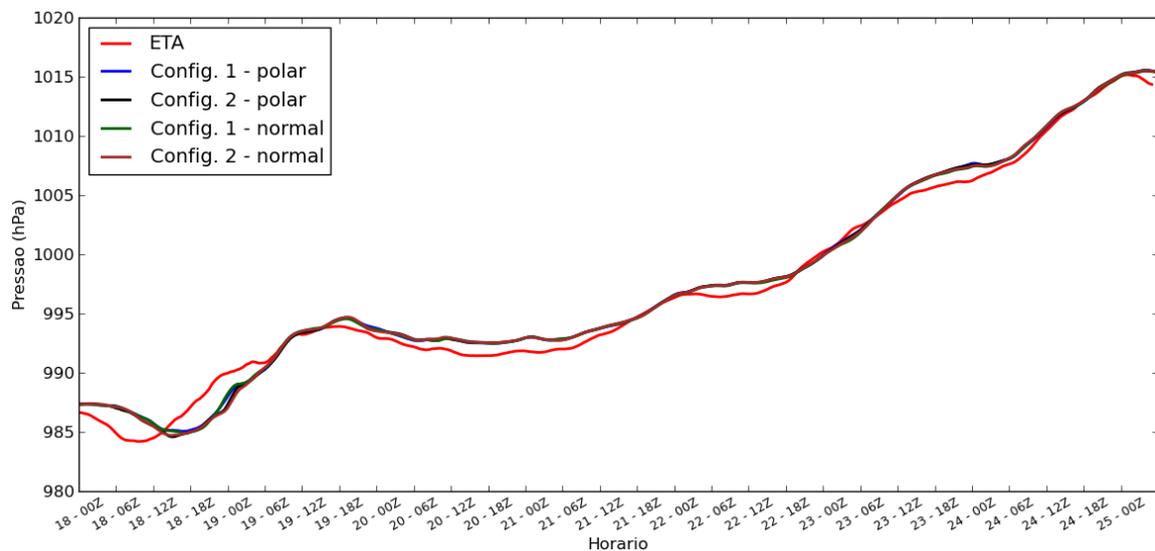


Figura 4: Pressão na superfície (hPa). Em vermelho, dados do projeto ETA. Nas outras cores, as 4 rodadas que foram comparadas graficamente.

A razão de mistura (Fig. 7) foi melhor representado pelo conjunto de parametrizações usando o WSM6 (configuração 2). A temperatura do solo (Fig. 8) foi melhor representado pelo conjunto de parametrizações usando o MYDM (configuração 1).

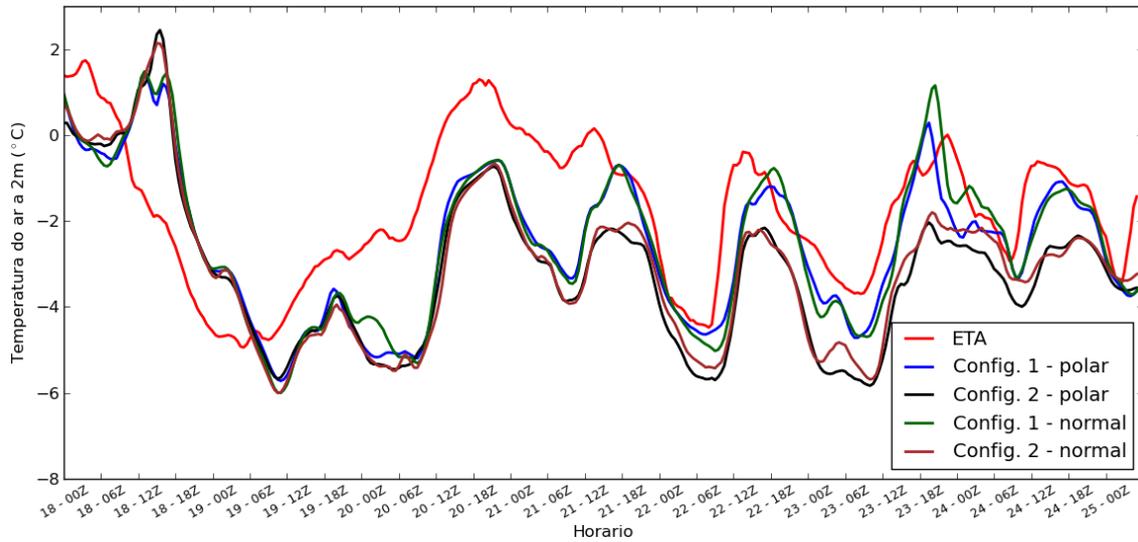


Figura 5: Temperatura do ar a 2m (°C). Em vermelho, dados do projeto ETA. Nas outras cores, as 4 rodadas que foram comparadas graficamente.

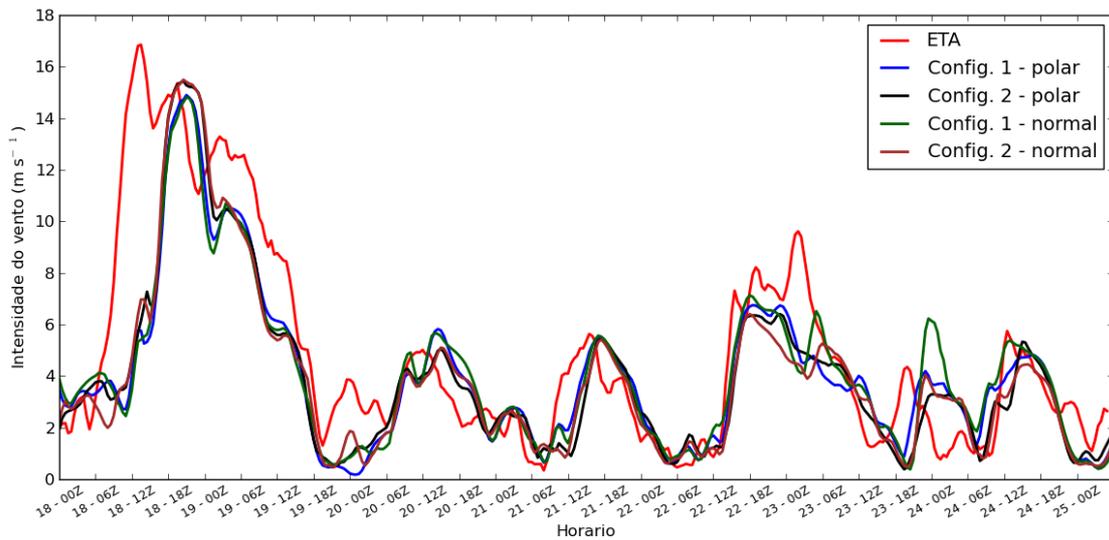


Figura 6: Intensidade do vento (ms^{-1}). Em vermelho, dados do projeto ETA. Nas outras cores, as 4 rodadas que foram comparadas graficamente.

O saldo de onda curta (Fig. 9) foi bem estimado pela parametrização de microfísica MYDM, porém ele superestimou OC nos dias 22 e 23 de fevereiro, dias em que foram bem representados pela configuração 2.

Comparando visualmente, nota-se que nos períodos de céu claro o modelo consegue representar bem as condições meteorológicas encontradas (Fig. 9 e Fig. 10). O período em que ocorre precipitação em forma de neve, no dia 18, não é bem representado pelo modelo, apesar dele apresentar precipitação no mesmo período, porém com mais intensidade no dia anterior.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

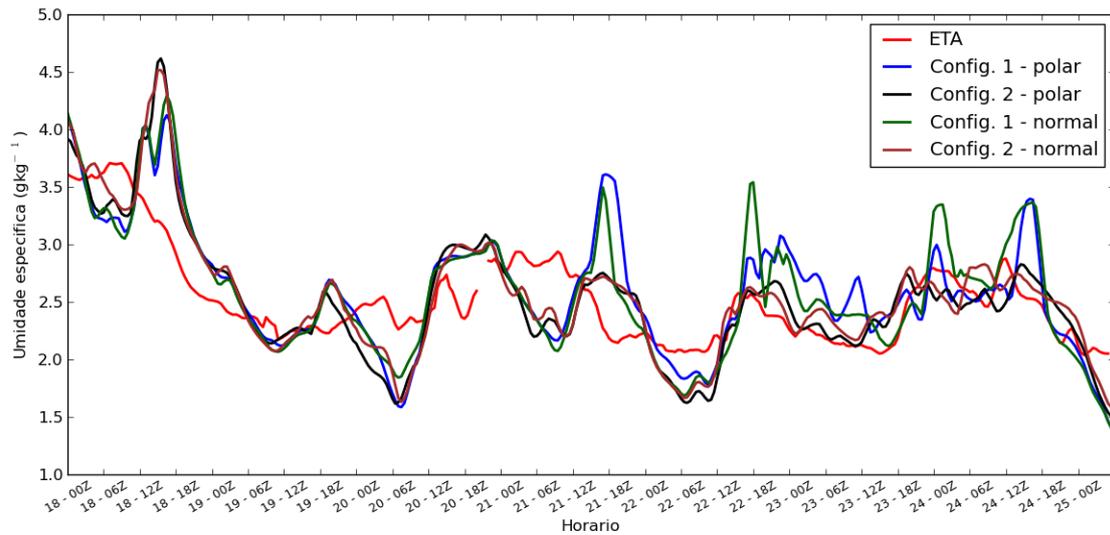


Figura 7: Razão de mistura (gkg^{-1}). Em vermelho, dados do projeto ETA. Nas outras cores, as 4 rodadas que foram comparadas graficamente.

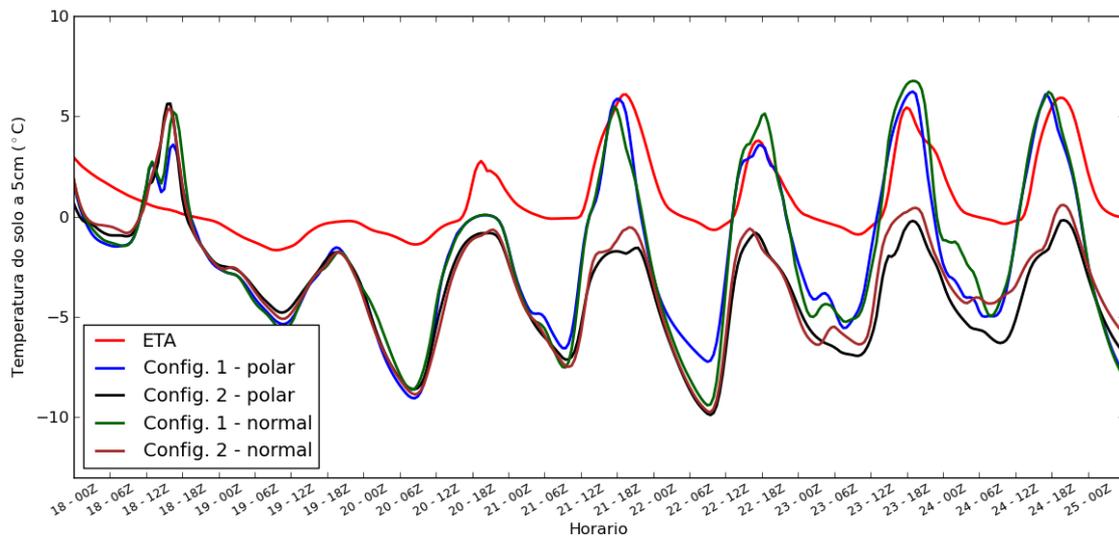


Figura 8: Temperatura do solo a 5cm ($^{\circ}\text{C}$) (projeto ETA), temperatura da camada superior do solo (WRF). Em vermelho, dados do projeto ETA. Nas outras cores, as 4 rodadas que foram comparadas graficamente.

A radiação de onda longa emitida pela atmosfera em direção a superfície (Fig. 10) foi subestimada pelos dois conjuntos de parametrizações, devido ao WRF ter dificuldade de representar $\text{OL}\downarrow$ e a cobertura de nuvens e seus efeitos (Bromwich *et al.*, 2013). O déficit de $\text{OL}\downarrow$ pode ser o responsável pelo modelo considerar a região mais fria, resultado encontrado novamente por Bromwich *et al.* (2013) e visto também nesse estudo, apesar do trabalho consultado ser sobre todo o continente antártico.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

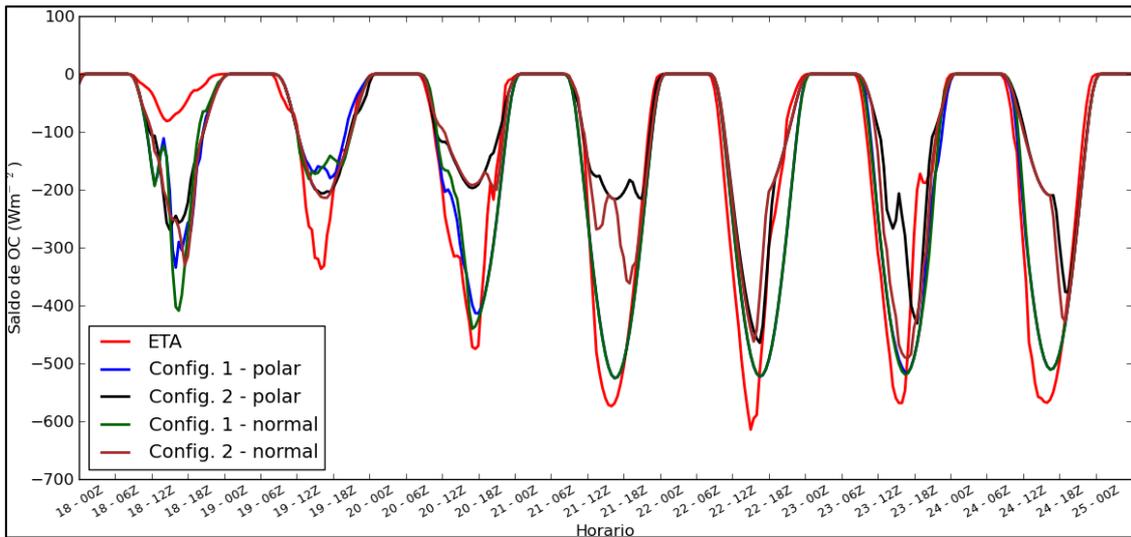


Figura 9: Saldo de onda curta (Wm^{-2}). Em vermelho, dados do projeto ETA. Nas outras cores, as 4 rodadas que foram comparadas graficamente.

O fluxo de calor sensível (Fig. 11) representado pela configuração 1 está equivalente ao calculado pelo modo indireto no período diurno. A configuração 2 apresenta H pequeno no período diurno, com uma diferença da ordem de 200 Wm^{-2} , quando comparado com os valores estimados e a configuração 1.

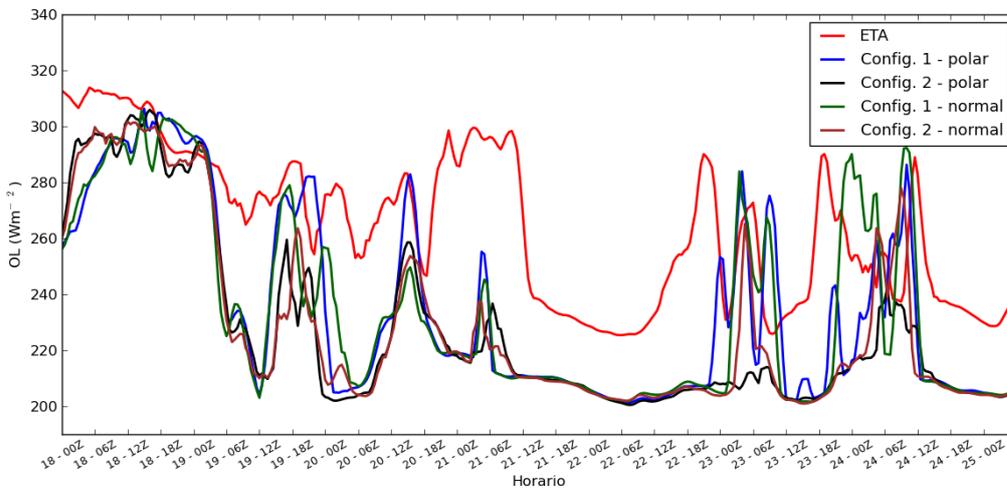


Figura 10: Radiação de onda longa incidente na superfície (Wm^{-2}). Em vermelho, dados do projeto ETA. Nas outras cores, as 4 rodadas que foram comparadas graficamente.

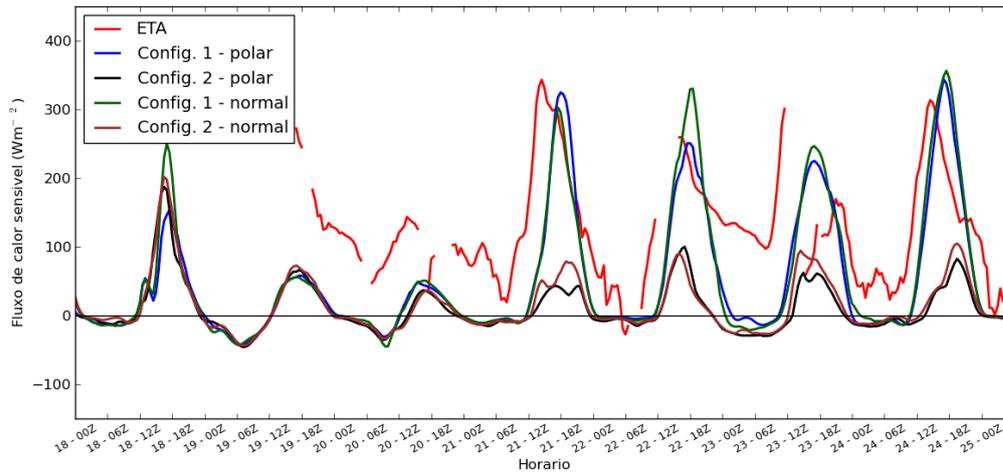


Figura 11: Fluxo de calor sensível (Wm^{-2}). Em vermelho, dados do projeto ETA. Nas outras cores, as 4 rodadas que foram comparadas graficamente.

Para LE (Fig. 12), os valores estimados estão compatíveis com os valores encontrados na configuração 2, novamente somente para o período diurno, enquanto que a configuração 1 superestimou os valores.

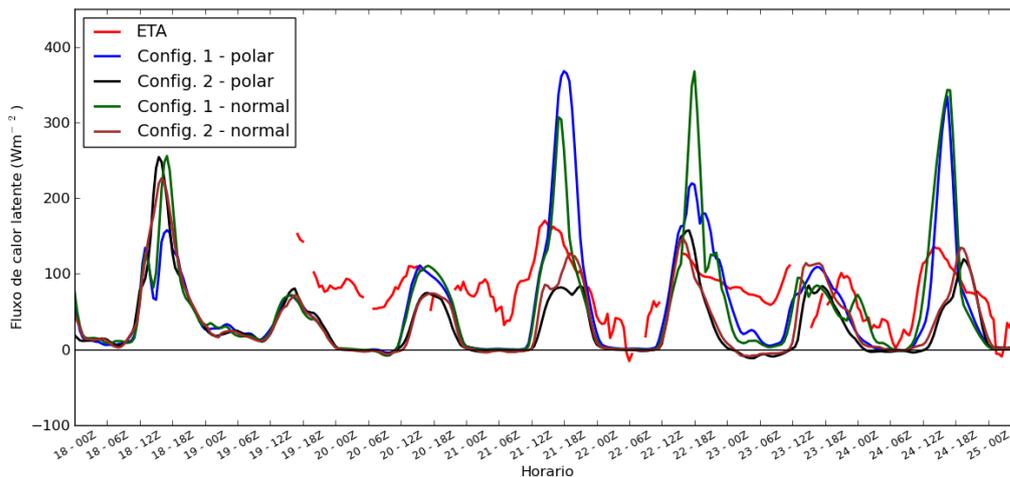


Figura 12: Fluxo de calor latente (Wm^{-2}). Em vermelho, dados do projeto ETA. Nas outras cores, as 4 rodadas que foram comparadas graficamente.

6. DISCUSSÃO

Neste trabalho foi examinado o balanço de energia na região da EACF, junto com um estudo do melhor modo de representar a região no modelo WRF. O balanço de energia será melhor analisado depois da instalação do anemômetro sônico, quando será possível comparar os valores estimados para H e LE pelo método indireto com o método direto.

O balanço de energia em superfície foi estimado usando a TSMO. Na próxima etapa do projeto o objetivo é realizar uma comparação dos valores estimados usando o método do perfil e o método da correlação (direto).

No estudo da região com o modelo, verificou-se que a diferença entre o PWRf e o WRF é mínima, mesmo resultado obtido por Kilpeläinen *et al.* (2012) para uma região no Ártico.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

O modelo simulou bem a pressão em superfície, a temperatura do ar e a intensidade do vento em todo o período analisado, enquanto que as outras variáveis foram melhor estimadas durante os períodos de pouca nebulosidade, devido principalmente ao modelo não representar bem a cobertura de nuvens.

Desse modo, após o estudo realizado, chegou-se a uma configuração de parametrização para ser usado nas rodadas futuras que abrangerão um período maior do verão.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bintanja, R., 1995: The local surface energy balance of the Ecology Glacier, King George Island, Antarctica: measurements and modelling, *Antarctic Science* 7(3): 315-325
- Braun, M., J. C. Simões, S. Vogt, U. F. Bremer, N. Blindow, M. Pfender, H. Saurer, F. E. Aquino, F. A. Ferron, 2001: An improved topographic database for King George Island: compilation, application and outlook. *Antarctic Science* 13(1): 41-52
- Bromwich, D. H., F. O. Otieno, K. M. Hines, K. W. Manning, and E. Shilo, 2013: Comprehensive evaluation of polar weather research and forecasting model performance in the Antarctic, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 274–292, doi:10.1029/2012JD018139.
- Codato, G., J. Soares, A. P. de Oliveira, A. C. L. Targino, C. J. Ruman, 2013: Observational Campaigns of the Project “Study of Turbulence in Antarctica”, *Annual Activity Report 2012*, doi:10.4322/apa.2014.088
- Choi, T., B. Y. Lee, S. Kim, Y. J. Yoon, H. Lee, 2008: Net radiation and turbulent energy exchanges over a non-glaciated coastal area on King George Island during four summer seasons, *Antarctic Science* 20 (1), 99-111.
- Dee, D. P. et al, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, Vol. 137: 553-597, DOI: 10.1002/qj.828
- Foken, T., 2008: The energy balance closure problem: An overview. *Ecol. Appl.*, 18(6), 1351-1367.
- Halouani, N., C. T. Nguyen and D. Vo-Ngoc, 1993: Calculation of monthly average global solar radiation on horizontal surfaces using daily hours of bright sunshine. *Solar Energy* 50 (3), 247–258.
- Janjic, Z. I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes, *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927–945.
- Liu, H., K. Jezek, B. Li, and Z. Zhao., 2001: Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model Version 2. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center.
- Kilpeläinen, T., T. Vihma, M. Manninen, A. Sjöblom, E. Jakobson, T. Palo and M. Maturilli, 2012: Modelling the vertical structure of the atmospheric boundary layer over Arctic fjords in Svalbard. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 138
- Mendes Junior, C. W., N. Dani, J. Aragon-Neto, J. C. Simões, L. F. Velho, R. R. Ribeiro, I. Parnow, U. F. Bremer, E. S. Fonseca Junior, H. J. B. Erwes, 2012: A new topographic map for Keller Peninsula, King George Island, Antarctica.
- Monin, A.S. and A.M. Obukhov, 1954: Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci., USSR*, (151), 163–187
- National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, NOAA, U.S. Department of Commerce (2000), NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999, <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2>, Research Data Archive at the National Center for



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, Colo. (Updated daily.) Acessado: 25 set 2013.

- Oliveira, A. P., J. Soares, G. Codato, A. C. L. Targino, C. J. Ruman, 2012: Energy balance at the surface in the King George Island - Preliminary results of ETA project, *Annual Activity Report 2011*, doi:10.4322/apa.2014.059
- Seefeldt, M. W., J. J. Cassano, M. D. Shupe, 2012: Evaluation of WRF Radiation and Microphysics Parameterizations for use in the Polar Regions, *Atmospheric Model Parameterizations in the Polar Regions Workshop*; Boulder, CO
- Simões, J. C., U. F. Bremer, 1995: Investigations of King George Island ice cover using ERS-1/SAR and spot imagery, Simposio ERS-1/2, *Antartica, un continente revelado*. vol 11. n. 1-2
- Simões, J. C., U. F. Bremer, F. E. Aquino, F. A. Ferron, 1999: Morphology and variations of glacial basins in the King George Island ice field, Antarctica. *Annals of Glaciology* 29: 220-223.
- Sinclair, M. R., 1994: An Objective Cyclone Climatology for the Southern Hemisphere. *American Meteorological Society, Vol 122*. 2239-2256.
- Stull, R. B., 1989: An Introduction to Boundary Layer Meteorology. *Kluwer Academic Publishers*. 666pp
- Skamarock, W.C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. Gill, D. Barker, M. Duda, X. Y. Huang, W. Wang, J. G. Powers, 2008: A description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Tech. Note, NCAR/TN-475+STR, 113 pp.
- Targino, A. C., J. Soares, 2002: Modeling surface energy fluxes for Ipero ,SP, Brazil: an approach using numerical inversion, *Atmospheric Research* 63 (2002) 101–121
- Onwuegbuzie, A., L. Daniel, N. Leech, 2007: Pearson product-moment correlation coefficient. In N. Salkind (Ed.), *Encyclopedia of measurement and statistics*. (pp. 751-756). Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, Inc. doi: <http://dx.doi.org/10.4135/9781412952644>
- Ruman, C. J., J. Soares, 2012: Estudo das propriedades radiométricas na região Antártica, *Relatório final de atividades de pesquisa de iniciação científica*.
- Wang, W., C. Bruyère, M. Duda, J. Dudhia, D. Gill, M. Kavulich, K. Keene, H. Lin, J. Michalakes, S. Rizvi, And X. Zhang, 2013: *ARW Version 3 Modeling System User's Guide*
- Wyngaard, J. C., 2010: *Turbulence in the Atmosphere*. Cambridge University Press. Cambridge, 393 pp.
- Zilitinkevich, S. S., 1995: Non-local turbulent transport: pollution dispersion aspects of coherent structure of convective flows, *Air Pollution III — Volume I*. Air Pollution Theory and Simulation, Eds. H. Power, N. Moussiopoulos and C.A. Brebbia. Computational Mechanics Publications, Southampton Boston, 53–60.

8. AGRADECIMENTOS