

6

Conclusões e Recomendações

No presente trabalho, uma série de experimentos numéricos foi realizada através de técnicas da DFC para avaliar a performance de três métodos para descrever o escoamento sobre dosséis de florestas. Para as simulações numéricas foi utilizado o pacote comercial FLUENT 6.2.16. Os casos simulados procuraram reproduzir experimentos de túnel de vento que utilizaram modelos de florestas artificiais com diferentes densidades de árvores m^{-2} (Novak et al., 2000; Novak et al., 2001).

Os resultados deste trabalho, cujo objetivo era investigar as características da turbulência dentro e acima de modelos de florestas artificiais, em geral concordaram com observações de outras superfícies vegetadas (Raupach et al., 1996; Katul et al., 2004). Os pontos mais importantes foram:

A modelagem por meio poroso necessitou de diferentes equações para o cálculo da porosidade, a fim de melhorar os resultados da simulação, visto que inicialmente para baixos valores de ϕ , os perfis verticais da velocidade apresentavam grandes desvios em relação aos dados experimentais.

Na primeira e segunda metodologias, a principal influência no campo de velocidade é a força de arrasto, que foi adicionada no termo fonte da equação de quantidade de movimento. A modelagem por meio poroso apresentou melhores resultados dos perfis verticais da velocidade do vento para o menor valor de ϕ em relação a modelagem por termos fontes, independentemente do valor de ρ_a . Entretanto, em ambas metodologias, os perfis verticais da velocidade do vento mostraram-se coerentes com os dados experimentais (Novak et al., 2000) e outros resultados encontrados na literatura, que utilizaram modelos de fechamento de ordem superior (Wilson, 1988; Katul et al., 1998).

Na modelagem por termos fontes, os resultados dos perfis verticais da intensidade da turbulência apresentaram boa concordância com os dados experimentais para os três modelos de florestas investigados. Quando a floresta foi considerada um meio poroso homogêneo, para o menor valor

da porosidade ocorreu uma superestimativa da intensidade da turbulência, independentemente do valor de ρ_a . Para o maior valor de ϕ foram obtidos bons resultados com a análise numérica dos perfis verticais da intensidade da turbulência.

Os perfis verticais do componente do tensor de Reynolds apresentaram desvios significativos em relação aos valores experimentais. Uma possível explicação para este resultado é que o modelo considera a isotropia para a viscosidade turbulenta, sendo incapaz de prever qualquer anisotropia da turbulência que poderia existir nas diferentes superfícies vegetadas investigadas. É importante destacar que em ambas as metodologias, o modelo consegue capturar que a floresta é sumidouro de quantidade de movimento, pois este componente do tensor de Reynolds tende a zero nas baixas regiões do dossel, em todas as simulações numéricas realizadas.

Qualitativamente os resultados dos vetores campo de velocidade no interior dos dosséis investigados apresentaram um comportamento adequado ao fenômeno físico do campo de escoamento, ou seja, foi possível observar a região de equilíbrio, de acordo com os estudos realizados por Morse et al. (2002). Além disso, foram capturadas as principais características do escoamento na região de esteira de florestas, cujos resultados estão de acordo com os experimentos realizados por Chen et al. (1995).

Na modelagem por elementos rugosos, os resultados numéricos dos perfis verticais da velocidade do vento e da intensidade da turbulência apresentaram discrepâncias em relação aos valores experimentais, independentemente do ângulo de incidência do escoamento em relação as árvores. Entretanto, os resultados obtidos mostram que os valores modelados dos perfis verticais modelados do componente do tensor de Reynolds foram semelhantes aos valores experimentais.

Através desta abordagem foram observados importantes fatores do campo de escoamento nas regiões próximas de uma árvore ou um conjunto de árvores. Qualitativamente, com esta metodologia foi possível visualizar que o escoamento de fluido ao incidir na região frontal de uma árvore era desacelerado e que parte da quantidade de movimento na direção principal foi transformada em quantidade de movimento lateral. Além disso, foi observado a formação de um escoamento reverso na região de esteira próxima de uma árvore.

Foi possível visualizar um rápido decréscimo da ECT na transição da superfície plana para a rugosa para as duas densidades de floresta investigadas. Pode-se então concluir que o escoamento do ar sofreu uma forte desaceleração ao penetrar no dossel devido à ação das forças de arrasto,

na região de distorção do escoamento.

No que tange a analogia do escoamento sobre dosséis com a camada de mistura, os principais resultados foram: (I) em todas as simulações numéricas pode ser observado o ponto de inflexão no perfil vertical da velocidade do vento próximo ao topo do dossel, (II) nas simulações numéricas 2-D, os resultados obtidos dos perfis de uma tangente hiperbólica mostram que o escoamento sobre dosséis apresenta um padrão semelhante ao escoamento na camada de mistura e (III) Nas simulações numéricas 3-D, apesar das previsões numéricas apresentarem semelhanças nas características turbulentas de outros dosséis, não foi possível plotar o perfil de uma tangente hiperbólica.

Na modelagem por termos fontes, a facilidade de construção do domínio computacional e sua discretização em malhas estruturadas apresentam uma série de vantagens para a aplicação deste método em relação as outras abordagens adotadas. Neste caso foi construída uma mesma geometria 2-D em coordenadas cartesianas de forma quadrangular para as três densidades de floretas investigadas. Portanto, para o caso de um modelo de floresta real, este mesmo procedimento pode ser adotado.

A modelagem por elementos rugosos apresentou algumas limitações em relação a construção do domínio computacional. Por exemplo, não foi possível modelar a floresta densa, pois seria necessário construir aproximadamente 900 modelos de árvores, considerando uma condição de simetria do túnel de vento. Assim, para as simulações numéricas do escoamento sobre florestas em escala real seria necessário um domínio computacional com um grande número de volumes de controle. Isto poderia aumentar o consumo de memória e gerar um alto custo computacional. Portanto, pode-se concluir que no caso de um modelo de floresta em escala real, esta metodologia apresentaria uma grande desvantagem em relação a modelagem por termos fontes.

As propriedades físicas dos dosséis necessárias para a modelagem por termos fontes foram o coeficiente de arrasto e a densidade de área foliar. Para a modelagem por meios porosos foram adotados dois valores da porosidade, ϕ_1 e ϕ_2 , respectivamente. Assim, foram necessários os valores da densidade de árvores e diâmetro médio das árvores para o cálculo de ϕ_1 e da área geométrica perpendicular ao solo e área frontal dos elementos individuais da vegetação para o cálculo de ϕ_2 . No terceiro método, as árvores foram construídas a partir das alturas e diâmetros da copa e do tronco, respectivamente. Neste trabalho foram utilizados dados obtidos em experimentos de túnel de vento. Entretanto, numa atmosfera

real, para determinados tipos de florestas as informações para a segunda abordagem não são facilmente encontradas na literatura.

A introdução dos termos fontes nas equações de transporte do modelo $k - \varepsilon$ padrão apresentou alto custo computacional. Além disso, esta metodologia é válida para uma atmosfera em condições neutra, indicando que esta não pode ser apropriada a aplicações em que existam condições instáveis ou estáveis. É importante destacar que na modelagem por elementos rugosos foram processadas num cluster de quatro máquinas, sendo cada uma delas dotadas de um processador Pentium IV 3,20 GHz, com 2,0 GB de memória RAM. Isto reduziu de forma considerável o tempo computacional.

De uma maneira geral, as propriedades dos campos médios e turbulentos do complexo escoamento em regiões de florestas foram reproduzidos adequadamente pelo modelo de turbulência $k - \varepsilon$ padrão. Espera-se assim, que o nível de detalhe fornecido pelo modelo possa auxiliar no desenvolvimento de novas parametrizações que representem de forma adequada o transporte turbulento na camada do dossel. Na avaliação dos métodos utilizados nas simulações numéricas que melhor atendessem o trabalho proposto, considera-se mediante a utilização de três métodos, que a modelagem por termos fontes foi a que mostrou melhor desempenho.

É importante destacar que a modelagem numérica do escoamento dentro e acima de dosséis de florestas não descreve totalmente a dinâmica destes ecossistemas. Entretanto, ela pode fornecer uma avaliação do estado da arte da hidrodinâmica de sistemas florestais. Por exemplo, a modelagem pode ser usada como ferramenta para prever cenários futuros dos impactos que as mudanças climáticas globais causam neste bioma.

Como sugestões para trabalhos futuros:

- (I) Implementar algumas modificações nos termos fontes de forma que o modelo $k - \varepsilon$ apresente melhores resultados do campo de velocidade nas baixas regiões do dossel.
- (II) Avaliar a capacidade da modelagem por termos fontes com modelo de turbulência $k - \varepsilon$ para simular escoamentos turbulentos da camada do dossel em condições de estabilidade instável.
- (III) Desenvolver um modelo numérico da dinâmica dos ecossistemas florestais para investigar os impactos que as mudanças climáticas podem causar nestes sistemas. Para alcançar este objetivo será necessário acoplar vários submodelos que incluem os processos de solo (ciclo de nutrientes, sistemas hidrológicos); regime de radiação no interior e

acima do dossel e a dispersão de gases e partículas provenientes da queima de biomassa.

- (IV) Realizar simulações do escoamento em regiões de florestas com a técnica LES para obter os campos instantâneos do campo de escoamento turbulento e assim, investigar a estruturas coerentes responsáveis pelas trocas turbulentas entre o interior do dossel e a superfície acima.