

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VANESSA CAROLINE MONTEIRO

IMPLEMENTAÇÃO DE LEVANTAMENTO DE PLUMA DE CHAMINÉS NO MODELO DE
DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS MODELAR

CURITIBA

2014

VANESSA CAROLINE MONTEIRO

IMPLEMENTAÇÃO DE LEVANTAMENTO DE PLUMA DE CHAMINÉS NO MODELO DE
DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS MODELAR

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carvalho de Almeida

CURITIBA

2014

Monteiro, Vanessa Caroline

Implementação de levantamento de pluma de chaminés no modelo de dispersão de poluentes atmosféricos modelar / Vanessa Caroline Monteiro. – Curitiba, 2014.

106 f. : il.; tabs., grafs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Orientador: Ricardo Carvalho de Almeida

1. Monitoramento ambiental. 2. Métodos de simulação. 3. Atmosfera – Pesquisa. I. Almeida, Ricardo Carvalho de. II. Título.

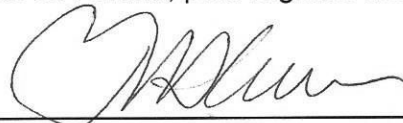
CDD: 628.5

TERMO DE APROVAÇÃO

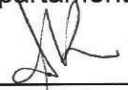
VANESSA CAROLINE MONTEIRO

IMPLEMENTAÇÃO DE LEVANTAMENTO DE PLUMA DE CHAMINÉS NO MODELO DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS MODELAR

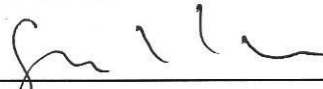
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



Prof. Dr. Ricardo Carvalho de Almeida
Orientador – Departamento de Engenharia Ambiental, UFPR



Dra. Akemi Kan
Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza –
Institutos LACTEC



Profa. Dra. Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha
Departamento de Engenharia Ambiental, UFPR

Curitiba, 28 de maio de 2014

Dedico esse trabalho aos meus amores: meus pais, Márcio e Dioneia, que sempre acreditaram em mim; às minhas irmãs, Andressa e Larissa, pelo companheirismo, risos e exemplos de perseverança; ao meu namorado, Paulo, por toda a paciência, carinho, amizade e horas de estudo compartilhadas. Dedico, também, à minha avó Rosa que, mesmo ausente fisicamente, está todos os dias em meu coração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois tudo o que alcancei não seria possível sem fé.

Ao meu orientador, prof. Dr. Ricardo Carvalho de Almeida, agradeço por todos os conselhos, pela orientação, pelo esforço compartilhado, e principalmente, por acreditar em mim.

Ao professor Nelson, coordenador do curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental.

À CAPES, pelo apoio e incentivo à pesquisa.

Aos meus familiares, pela compreensão nos meus dias de ausência e mau humor depois de noites mal dormidas. Pelo incentivo, por nunca terem me deixado desistir e por terem participado de toda esta jornada ao meu lado.

Às minhas amigas, Hellen e Maria, que mesmo de longe, participaram junto comigo de mais esta etapa.

Especialmente ao meu namorado, Paulo, cuja amizade e companheirismo foram fundamentais no decorrer dos meus estudos.

“Se não sabes, aprende. Se já sabes, ensina.”

Confúcio

RESUMO

O sistema MODELAR (ARMANI *et al.*, 2014), Modelo Regulatório de Qualidade do Ar para o Estado do Paraná, é composto por uma interface gráfica, uma base de dados micrometeorológicos e um modelo de dispersão atmosférica desenvolvido pelo grupo de pesquisa LEMMA (Laboratório de Estudos em Monitoramento e Modelagem Ambiental) da Universidade Federal do Paraná. O modelo é euleriano com solução numérica da equação de advecção-difusão e apresenta resultados comparáveis a modelos semelhantes recomendados internacionalmente, como o AERMOD (ARMANI *et al.*, 2014; CIMORELLI *et al.*, 2004). No entanto, este modelo não era capaz de simular o levantamento da pluma de poluentes. Desta forma suas simulações não eram adequadas para a previsão de concentrações em situações nas quais o levantamento da pluma é uma característica do tipo de emissão. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para implementar um módulo computacional que permita representar este efeito. Para validar a metodologia utilizam-se os dados do estudo de Indianópolis (HANNA *et al.*, 2005). Estes dados foram separados conforme a estabilidade atmosférica como estáveis e instáveis. Para os casos instáveis aplica-se a formulação de Briggs (1984) a cada passo da solução numérica da equação da advecção-difusão, permitindo acompanhar o comportamento da pluma desde a sua emissão. Para os casos de estabilidade adota-se o cálculo da altura efetiva de emissão (altura da fonte somada ao levantamento da pluma) como parâmetro de entrada do modelo. Para analisar estatisticamente a nova versão do MODELAR foi utilizada a metodologia definida por Hanna (1988; 1989). Os resultados obtidos para estes experimentos foram comparados a outros modelos, tendo sido competitivos com modelos internacionalmente recomendados.

Palavras-chave: levantamento de pluma, dispersão atmosférica, MODELAR

ABSTRACT

The MODELAR system (ARMANI *et al.*, 2014), is an atmospheric dispersion model under development by the LEMMA (Laboratório de Estudos em Monitoramento e Modelagem Ambiental) research group at Federal University of Paraná. It is an eulerian model that produces a numerical solution of the advection-diffusion equation. The MODELAR system presents results comparable with other well established air quality models such as AERMOD. However, the model is not able to simulate the rise of a plume of pollutants. Therefore, the formulations are not suitable to predict concentrations in situations where the plume rise is a relevant feature of the emission. The goal of this work is to develop a method to implement a computational module in MODELAR that can simulate the plume rise. In order to validate the method data of the Indianapolis experiment were used (HANNA *et al.*, 2005). The validation experiments were separated according to the stability conditions of the atmospheric boundary layer. For unstable cases the plume rise formulation of Briggs (1984) was applied during the numerical solution of the advection-diffusion equation for each column of fluid in the numerical domain. On the other hand, for stable cases the effective height of the emission was employed as an input to the model. Statistical analyses of the results of the simulations produced by this new version of MODELAR were performed following the methodology recommended by Hanna (1988; 1989). It was observed that the performance of MODELAR with the plume rise parameterization was competitive with that obtained by other models described in the literature.

Key-words: plume rise, atmospheric dispersion, MODELAR

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 –	CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA E ATMOSFERA LIVRE. FONTE: ADAPTADO DE STULL (2000).	19
FIGURA 2 –	VARIAÇÃO DIURNA DA ALTURA E ESTRUTURA DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA. FONTE: ADAPTADO DE STULL (2000).	20
FIGURA 3 –	REPRESENTAÇÃO DA PLUMA DE POLUENTES.	25
FIGURA 4 –	FATORES QUE INFLUENCIAM O LEVANTAMENTO DA PLUMA DE POLUENTES.	26
FIGURA 5 –	NÚCLEO DA PLUMA DE POLUENTES (LINHA TRACEJADA).	28
FIGURA 6 –	MAPA MOSTRANDO A LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE <i>PERRY-K</i> (A), O ESTÁDIO <i>HOOSIER DOME SPORT</i> (B), E O DISTRITO COMERCIAL CENTRAL DE INDIANÁPOLIS (C). EM (D) ESTÁ LOCALIZADA A ESTAÇÃO METEOROLÓGICA CENTRAL DE SUPERFÍCIE DE INDIANÁPOLIS, E A ESTAÇÃO “ <i>BANK TOWER</i> ” ESTÁ NO TOPO DO PRÉDIO EM (E). FONTE: TRC (1986).	35
FIGURA 7 –	LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES METEOROLÓGICOS. O CÍRCULO PREENCHIDO É A ESTAÇÃO DE <i>PERRY-K</i> . OS TRIÂNGULOS SÃO MEDIDAS DE TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE. OS ASTERISCOS SÃO ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS PRIMÁRIAS. OS QUADRADOS SÃO ESTAÇÕES DE LANÇAMENTO DE RADIOSSONDAS. FONTE: TRC (1986).	36
FIGURA 8 –	PLUMA EMITIDA A PARTIR DA ALTURA h_s , NA GRADE DO MODELO.	40
FIGURA 9 –	CÁLCULO DO $\Delta h'$ NO PRIMEIRO PASSO DA SOLUÇÃO NUMÉRICA.	40
FIGURA 10 –	COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS E COMPARAÇÃO DO NÚCLEO DA PLUMA DE POLUENTES PARA O EXPERIMENTO 3, CASO INSTÁVEL. (pc: COM INTERRUPTÃO DO LEVANTAMENTO DA PLUMA; ps: SEM INTERRUPTÃO DO LEVANTAMENTO DA PLUMA; obs: CONCENTRAÇÃO OBSERVADA.)	47
FIGURA 11 –	SEÇÃO RETA VERTICAL DA DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PARA O EXPERIMENTO 3, CASO INSTÁVEL.	48

FIGURA 12 –	COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS E COMPARAÇÃO DO NÚCLEO DA PLUMA DE POLUENTES PARA O EXPERIMENTO 5, CASO INSTÁVEL. (pc: COM INTERRUPÇÃO DO LEVANTAMENTO DA PLUMA; ps: SEM INTERRUPÇÃO DO LEVANTAMENTO DA PLUMA; obs: CONCENTRAÇÃO OBSERVADA).	49
FIGURA 13 –	SEÇÃO RETA VERTICAL DA DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PARA O EXPERIMENTO 5, CASO INSTÁVEL.	50
FIGURA 14 –	COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES PREVISTAS INTEGRADAS E NORMALIZADAS PELO MODELAR E AS CONCENTRAÇÕES OBSERVADAS INTEGRADAS E NORMALIZADAS NO EXPERIMENTO DE INDIANÁPOLIS PARA OS CASOS INSTÁVEIS.	51
FIGURA 15 –	COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS E COMPARAÇÃO DO NÚCLEO DA PLUMA DE POLUENTES PARA O EXPERIMENTO 5, CASO ESTÁVEL. (h_e : ALTURA EFETIVA; ch: SEM LEVANTAMENTO DE PLUMA; obs: CONCENTRAÇÃO OBSERVADA.)	55
FIGURA 16 –	SEÇÃO RETA VERTICAL DA DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PARA O EXPERIMENTO 5, CASO ESTÁVEL.	56
FIGURA 17 –	COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS E COMPARAÇÃO DO NÚCLEO DA PLUMA DE POLUENTES PARA O EXPERIMENTO 11, CASO ESTÁVEL. (h_e : ALTURA EFETIVA; ch: SEM LEVANTAMENTO DE PLUMA; obs: CONCENTRAÇÃO OBSERVADA.)	57
FIGURA 18 –	SEÇÃO RETA VERTICAL DA DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PARA O EXPERIMENTO 11, CASO ESTÁVEL.	58
FIGURA 19 –	COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES PREVISTAS INTEGRADAS E NORMALIZADAS PELO MODELAR E AS CONCENTRAÇÕES OBSERVADAS INTEGRADAS E NORMALIZADAS NO EXPERIMENTO DE INDIANÁPOLIS PARA OS CASOS ESTÁVEIS.	59

FIGURA 20 –	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELAR ÀS VARIAÇÕES DOS PARÂMETROS u_* E z_i PARA CLA ESTÁVEL Co: VALORES IDEAIS PARA OS PARÂMETROS ESTATÍSTICOS (CONCENTRAÇÕES OBSERVADAS INTEGRADAS E NORMALIZADAS); Cp: VALORES PREVISTOS SEM VARIAÇÃO DE PARÂMETROS (CONCENTRAÇÕES PREVISTAS INTEGRADAS E NORMALIZADAS).	63
FIGURA 21 –	SISTEMA <i>DIAL</i> . FONTE: TRC (1986).	65
FIGURA 22 –	COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE Δh_{max} PREVISTOS PELO MODELAR E AS ALTURAS OBSERVADAS NO EXPERIMENTO DE INDIANÁPOLIS.	67

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 –	DADOS METEOROLÓGICOS E DE EMISSÃO UTILIZADOS PARA OS EXPERIMENTOS INSTÁVEIS ($L < 0$).	37
TABELA 2 –	DADOS METEOROLÓGICOS E DE EMISSÃO UTILIZADOS PARA OS EXPERIMENTOS ESTÁVEIS ($L > 0$).	37
TABELA 3 –	Δh_{max} (metros) PARA CASOS INSTÁVEIS EM DIFERENTES FORMULAÇÕES.	38
TABELA 4 –	Δh_{max} (metros) PARA CASOS ESTÁVEIS EM DIFERENTES FORMULAÇÕES.	39
TABELA 5 –	CONCENTRAÇÕES OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE, INTEGRADAS E NORMALIZADAS (C_o^y/Q); CONCENTRAÇÕES PREVISTAS NA SUPERFÍCIE, INTEGRADAS E NORMALIZADAS SEM INTERRUPTÃO DO LEVANTAMENTO DA PLUMA (C_{ps}^y/Q) E COM INTERRUPTÃO DO LEVANTAMENTO DA PLUMA (C_{pc}^y/Q).	45
TABELA 6 –	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA OS CASOS INSTÁVEIS.	52
TABELA 7 –	CONCENTRAÇÕES OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE, INTEGRADAS E NORMALIZADAS (C_o^y/Q); CONCENTRAÇÕES PREVISTAS NA SUPERFÍCIE, INTEGRADAS E NORMALIZADAS A PARTIR DA ALTURA EFETIVA (C_{he}^y/Q) E A PARTIR DA ALTURA DA CHAMINÉ SEM LEVANTAMENTO DE PLUMA (C_{ch}^y/Q).	53
TABELA 8 –	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA OS CASOS ESTÁVEIS.	59
TABELA 9 –	COMPARAÇÃO ESTATÍSTICA DO EXPERIMENTO DE INDIANÁPOLIS: CLA ESTÁVEL	60
TABELA 10 –	COMPARAÇÃO ENTRE PREVISÕES DE DIFERENTES MODELOS DE DISPERSÃO PARA O EXPERIMENTO DE INDIANÁPOLIS.	64
TABELA 11 –	COMPARAÇÃO ENTRE Δh_{max} (metros) OBSERVADO E PREVISTO PARA OS CASOS INSTÁVEIS.	65
TABELA 12 –	COMPARAÇÃO ENTRE Δh_{max} (metros) OBSERVADO E PREVISTO PARA OS CASOS ESTÁVEIS.	66
TABELA 13 –	CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS CALCULADAS PARA Δh_{max} PREVISTO E Δh_{max} SIMULADO: EXP. 5 ESTÁVEL.	67
TABELA 14 –	CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS CALCULADAS PARA Δh_{max} OBSERVADO E Δh_{max} PREVISTO: EXP. 9 INSTÁVEL.	68

LISTA DE SIGLAS

AL	–	Atmosfera Livre
ch	–	Experimento sem levantamento da pluma
CLA	–	Camada Limite Atmosférica
CLC	–	Camada Limite Convectiva
CLE	–	Camada Limite Estável
CLP	–	Camada Limite Planetária
ADMS	–	Advanced Dispersion Modeling System
DAM	–	Datasets Atmospheric Modelling
FA2	–	Fator de 2
FB	–	Desvio fracional
ISC3	–	Industrial Source Complex Model Version 3
LEMMA	–	Laboratório de Estudos em Monitoramento e Modelagem Ambiental
MG	–	Desvio médio geométrico
NMSE	–	Erro médio quadrático normalizado
pc	–	Experimento com interrupção do levantamento da pluma
ps	–	Experimento sem interrupção do levantamento da pluma
R	–	Correlação de Pearson
TDMA	–	TriDiagonal Matrix Algorithm
VG	–	Variância geométrica
US-EPA	–	United States Environmental Protection Agency

LISTA DE SÍMBOLOS

α	– Umidade específica do ar	(–)
β_b	– Parâmetro de entranhamento devido a flutuabilidade	(–)
β_m	– Parâmetro de entranhamento devido ao <i>momentum</i>	(–)
δ	– Delta de Dirac	(–)
$\bar{\Delta}$	– Diferença média das amostras de <i>Bootstrap</i>	(–)
Δh	– Elevação da pluma	(m)
Δh_{max}	– Elevação máxima da pluma	(m)
Δx	– Espaçamento da grade do modelo em x	(–)
Δz	– Espaçamento da grade do modelo em z	(–)
ι	– Espaçamento de grade no topo do modelo	(–)
κ	– Constante de von Karman	(–)
Λ	– Comprimento local de Monin-Okukhov	(m)
Ψ_m	– Função de estabilidade	(–)
ρ	– Densidade	(kg/m ³)
ρ_a	– Densidade do ar	(kg/m ³)
ρ_s	– Densidade do efluente no topo da chaminé	(kg/m ³)
σ_{Δ}	– Desvio padrão das diferenças entre as amostras de <i>Bootstrap</i>	(–)
τ_o	– Fluxo vertical turbulento de quantidade de movimento	(–)
θ	– Temperatura potencial	(–)
θ_v	– Temperatura potencial virtual	(–)
ϑ	– Altura do primeiro nível do modelo a partir da superfície	(–)
B	– Número de amostras de <i>Bootstrap</i>	(–)
c_p	– Calor específico à pressão constante da atmosfera	(cal/(g.°C))
C	– Concentração do poluente	(μg/m ³)
C^y/Q	– Concentração do poluente integrada e normalizada	(s/m ²)
f	– Coeficiente de Coriolis	(–)
F_b	– Fluxo de flutuabilidade	(m ⁴ /s ³)
F_m	– Fluxo de quantidade de movimento	(m ⁴ /s ³)
g	– Aceleração da gravidade	(m/s ²)
h_e	– Altura efetiva	(m)
h_s	– Altura da chaminé	(m)
H_0	– Fluxo de calor sensível	(W/m ²)
i	– Indexação horizontal	(–)
k	– Indexação vertical	(–)
K_x	– Parâmetro de turbulência horizontal	(–)
K_y	– Parâmetro de turbulência transversal	(–)

K_z	–	Parâmetro de turbulência vertical	(–)
L	–	Comprimento de Monin-Obukhov	(m)
P_a	–	Pressão do ar	(mb)
P_r	–	Pressão de referência	(mb)
Q	–	Taxa de emissão mássica	(g/s)
Q_h	–	Taxa de emissão de calor do efluente	($kcal/s$)
r	–	Raio interno da chaminé	(m)
S	–	Termo de fonte ou sumidouro de poluente	(–)
t	–	$\bar{\Delta}/\sigma_{\Delta}$, baseado na distribuição <i>t-Student</i>	(–)
T	–	Temperatura real	($^{\circ}C$)
T_a	–	Temperatura do ar	($^{\circ}C$)
T_s	–	Temperatura do efluente no topo da chaminé	($^{\circ}C$)
u	–	Velocidade do vento	(m/s)
\bar{u}	–	Velocidade média do vento	(m/s)
u_*	–	Velocidade de atrito	(m/s)
U	–	Velocidade média da componente x do vento	(m/s)
\bar{U}	–	Perfil médio da velocidade do vento na direção longitudinal	(–)
V	–	Velocidade média da componente y do vento	(m/s)
W	–	Velocidade média da componente z do vento	(m/s)
w_s	–	Velocidade de emissão do efluente	(m/s)
w_*	–	Escala de velocidade convectiva	(–)
x	–	Distância horizontal	(m)
y	–	Distância transversal	(m)
z	–	Altura acima do solo	(m)
z_i	–	Altura da Camada Limite Atmosférica	(m)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	18
1.2 OBJETIVOS	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 ASPECTOS SOBRE A ATMOSFERA	19
2.1.1 Camada limite atmosférica e turbulência	19
2.2 MODELOS DE TRANSPORTE ADVECTIVO E DIFUSIVO	23
2.3 POLUENTES EMITIDOS POR FONTES FIXAS, PONTUAIS E CONTÍNUAS	24
2.3.1 Levantamento de pluma	25
3 METODOLOGIA	30
3.1 O MODELAR	30
3.1.1 Equações características	31
3.1.2 Modelo numérico	33
3.2 EXPERIMENTO DE INDIANÁPOLIS	35
3.2.1 Seleção dos dados	37
3.3 IMPLEMENTAÇÃO DO LEVANTAMENTO DA PLUMA	38
3.4 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	41
3.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	43
4 RESULTADOS	44
4.1 CASOS INSTÁVEIS	44
4.2 CASOS ESTÁVEIS	52
4.3 DISCUSSÃO	64
6 CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS	72
APÊNDICES	78
ANEXOS	101

1 INTRODUÇÃO

Os modelos de transporte advectivo e difusivo de poluentes, também chamados de modelos de dispersão atmosférica, são ferramentas empregadas para previsão de concentrações de poluentes. O emprego da modelagem possibilita que sejam tomadas medidas necessárias para minimizar impactos ambientais.

Considerando a importância dos modelos de dispersão atmosférica, estes são classificados através do referencial adotado no estudo do comportamento das partículas emitidas. Têm-se, então, os modelos eulerianos e lagrangeanos. Os primeiros são baseados nas equações da continuidade e da advecção-difusão e têm um sistema de referência fixo em relação à Terra. Já os lagrangeanos, baseados na equação de Langevin, têm um sistema de referência que acompanha a partícula de poluentes ao longo de sua trajetória.

Um exemplo de modelo de dispersão atmosférica é o sistema MODELAR (ARMANI *et al.*, 2014) desenvolvido pelo grupo de pesquisa da Universidade Federal do Paraná, LEMMA (Laboratório de Modelagem e Monitoramento Ambiental). Este sistema é composto por uma interface gráfica, uma base de dados micrometeorológicos e um modelo euleriano de dispersão de poluentes que simula fontes fixas, pontuais e contínuas. Para solucionar a equação da advecção-difusão utilizam-se métodos numéricos, o que possibilita adotar condições mais realísticas, se comparadas com as soluções analíticas. As soluções analíticas correspondem a condições mais simplificadas, pois consideram o perfil de velocidade do vento e a turbulência como constantes.

O sistema MODELAR já é comparável a modelos reconhecidos e utilizados internacionalmente (ARMANI, 2011; ARMANI *et al.*, 2014), como o AERMOD (CIMORELLI *et al.*, 2004; EPA, 2005). No entanto, sua aplicação é restrita a previsões sem levantamento de pluma. Desta forma, não é possível reproduzir condições em que a pluma de poluentes é afetada pela diferença de temperatura entre ela e o ambiente, ou por condições em que a velocidade de emissão da pluma é muito superior a do ambiente. Essa é uma situação em que a pluma, logo após sua emissão, se eleva a uma altura superior à da chaminé. No entanto, a descrição do levantamento de plumas em modelos de dispersão atmosférica não é simples. Diversos pesquisadores da área descreveram equações que pudessem representar esta situação. Dentre essas formulações, muitas são empíricas, além de outras serem obtidas por análise dimensional ou a partir de equações de dinâmica dos fluidos (CARSON e MOSES, 1969).

Para que o sistema MODELAR pudesse fornecer previsões mais realísticas optou-se por empregar as formulações desenvolvidas por Briggs (BRIGGS, 1975; 1984) para o cálculo do levantamento da pluma. Esta tem sido a formulação empregada em diversos modelos, entre eles o AERMOD (CIMORELLI *et al.*, 2004).

Na implementação da metodologia sugerida são avaliadas duas condições atmosféricas distintas. A primeira é para a atmosfera instável, e a segunda condição é para a atmosfera estável. Para analisar o comportamento da pluma após a implementação da metodologia para o caso de instabilidade atmosférica, duas situações são então comparadas: na primeira permite-se que a pluma se eleve sem restrição; na segunda situação impõe-se que a pluma seja interrompida caso atinja uma determinada altura, delimitada pela equação de Briggs de 1975. Nesta condição emprega-se o cálculo da altura da pluma durante a solução numérica da equação da difusão-advecção para cada coluna do fluido no domínio numérico. Desta forma, permite-se acompanhar o levantamento da pluma desde as proximidades da fonte de emissão, possibilitando prever concentrações próximas a fonte.

No entanto, para os casos de estabilidade, uma metodologia alternativa é aplicada e há uma comparação entre duas outras formas de se obter as concentrações: 1) utilizando-se a abordagem mais tradicional, obtida através da altura efetiva da fonte (altura da chaminé somada a altura de levantamento máximo da pluma), aplicada como parâmetro de entrada do modelo e 2) sem a aplicação do levantamento da pluma.

Para a validação da metodologia empregada são empregadas estatísticas recomendadas a modelos de dispersão de poluentes atmosféricos (HANNA, 1988;1989), e o teste *t-Student* através da reamostragem de *Bootstrap* para comparar versões do modelo aos experimentos de Indianápolis (DAM, 2013; HANNA *et al.*, 2005; OLESEN, 2005; TRC, 1986). Os experimentos de Indianápolis foram realizados nos Estados Unidos, e possuem a documentação necessária para que possam ser reproduzidos através da modelagem de dispersão de poluentes. Foram realizados testes de análise de sensibilidade para os dados de velocidade de atrito (u_*) e altura da camada limite atmosférica (z_i), pois são os parâmetros que mais afetam o comportamento da pluma de poluentes (CONTE, 2013). Através deste tipo de análise é possível estimar se algumas inconsistências nas simulações do modelo são oriundas de erros nos parâmetros de entrada.

Desta forma o trabalho será dividido em:

1. Revisão de Literatura – neste capítulo abordam-se os principais pontos referentes ao estudo da atmosfera, como a camada limite atmosférica e a turbulência, além de uma revisão sobre modelos de dispersão atmosférica e formulações de levantamento de pluma.
2. Metodologia – neste capítulo especificam-se os métodos adotados para cálculo do levantamento da pluma e das estatísticas, assim como o procedimento para efetivá-los.
3. Resultados – serão apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da

metodologia descrita.

4. Conclusões e recomendações – nesta parte constam as conclusões obtidas e são apresentadas recomendações para trabalhos futuros.

1.1 JUSTIFICATIVA

A necessidade de investigar a dinâmica dos poluentes na atmosfera torna o desenvolvimento de modelos de dispersão atmosférica uma ferramenta indispensável. Através desses modelos pode-se descrever e interpretar dados experimentais, analisar a qualidade do ar, administrar as liberações acidentais e avaliar as áreas de risco, identificar fontes poluidoras, avaliar a contribuição de uma única fonte à carga poluidora, e gerenciar e planejar a ocupação do território. Assim, é possível elaborar planejamentos regionais e planos de emergência, sistemas de controle complementares, sistemas de previsão de qualidade do ar, transportes de larga escala (por exemplo, a chuva ácida), implementar planos de previsão e revisão de fontes novas, prevenir acidentes e deteriorações significativas. Portanto, busca-se aprimorar modelos de dispersão para obter-se resultados cada vez mais precisos e acurados.

O cálculo do levantamento de pluma é um dos fatores que influencia na correta estimativa do transporte e dispersão de poluentes na atmosfera e previsão das concentrações no nível do solo (ALESSANDRINI *et al.*, 2013). Desta forma, o MODELAR (ARMANI *et al.*, 2014), um modelo regulatório de qualidade do ar, necessita de um módulo adicional para cálculo do levantamento da pluma, para que se torne capaz de reproduzir resultados mais confiáveis.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é implementar uma metodologia que possa ser aplicada ao sistema MODELAR (ARMANI *et al.*, 2014) para representar o levantamento da pluma de poluentes (Δh).

Objetivos específicos compreendem a verificação da consistência entre as formulações encontradas na literatura, e as formulações recomendadas internacionalmente; aplicar ao modelo uma das formulações de forma a ser possível o cálculo do levantamento da pluma a cada passo no espaço da solução numérica. Para validar o modelo será utilizado o estudo de Indianápolis (HANNA *et al.*, 2005) como referência, empregando-se índices estatísticos como descritos por Hanna (1988; 1989).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ASPECTOS SOBRE A ATMOSFERA

Para os estudos da dispersão de poluentes, os esforços concentram-se na compreensão dos processos físicos envolvidos na camada mais próxima da superfície, a troposfera. Nesta seção será definida a camada limite atmosférica e será descrito o processo de transporte advectivo e difusivo nesta região.

2.1.1 Camada limite atmosférica e turbulência

A troposfera subdivide-se, essencialmente, entre duas camadas: atmosfera livre (AL) e a camada limite atmosférica (CLA). A atmosfera livre é dominada por processos associados a larga escala, portanto os efeitos de superfície são desprezíveis. No entanto, a CLA, também denominada camada limite planetária (CLP), sofre influência direta da superfície da Terra, e tem uma espessura variável no espaço e no tempo. Essa é uma região onde predominam os efeitos da turbulência, na qual os processos de difusão são bastante relevantes (FIGURA 1).

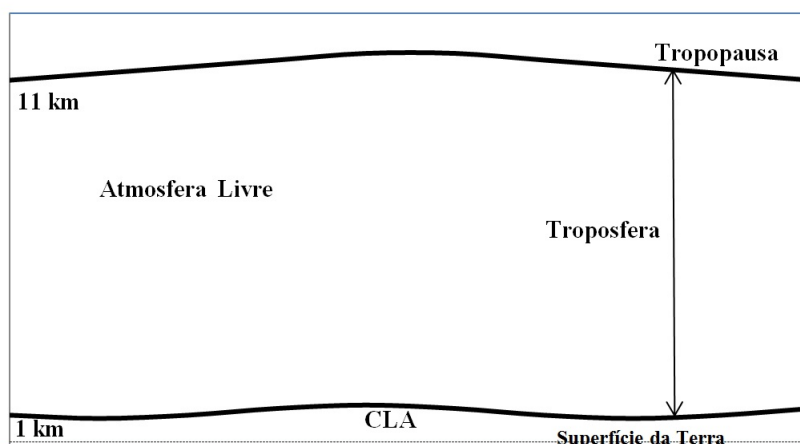


FIGURA 1 – CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA E ATMOSFERA LIVRE. FONTE: ADAPTADO DE STULL (2000).

O cisalhamento interno entre as camadas de ar e a superfície rugosa da Terra gera a turbulência mecânica dentro da CLA, enquanto a turbulência térmica é o resultado dos fluxos de calor na superfície. Durante as primeiras horas do dia, ocorre o crescimento da CLA, devido à radiação e ao fluxo de calor sensível positivo. A altura máxima desta camada ocorre no final da tarde, que é o momento em que a turbulência térmica está cessando. À noite, o fluxo de calor sensível é negativo e, portanto, a temperatura potencial aumenta com a distância da superfície, e não ocorre movimento vertical gerado por convecção e a

única forçante para o crescimento da CLA passa a ser a turbulência mecânica (SEINFELD, 1975).

A CLA, sob condição de alta pressão, em escala sinótica, apresenta uma estrutura temporal bem definida. É normalmente classificada, para efeitos práticos, quanto às suas forçantes em: camada de mistura (ou camada limite convectiva), camada residual e camada limite estável (FIGURA 2).

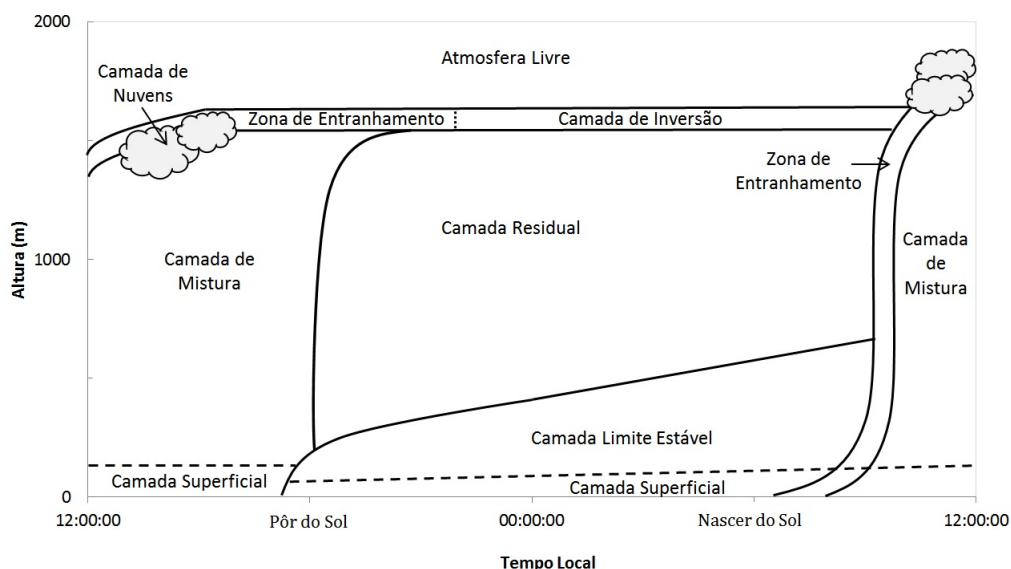


FIGURA 2 – VARIAÇÃO DIURNA DA ALTURA E ESTRUTURA DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA. FONTE: ADAPTADO DE STULL (2000).

A camada limite convectiva (CLC) é uma camada com grande intensidade de turbulência produzida, principalmente, por efeitos térmicos e células convectivas e, secundariamente, pelo cisalhamento do vento. Os maiores gradientes de vento e temperatura ocorrem próximo à superfície, enquanto uma mistura vertical tende a homogeneizar esses perfis. A CLC estende-se entre 1 e 2 km de altura, acima da qual encontra-se a camada de inversão que atua bloqueando os movimentos verticais e restringindo o domínio da turbulência. Pode-se, portanto, definir a CLC como a região da atmosfera que se estende do solo até a base de uma camada de inversão, com forte mistura gerada pelo fluxo vertical de calor positivo.

A CLC pode ser ainda subdividida em três camadas: camada limite superficial, camada de mistura e a zona de entranhamento, também chamada de camada interfacial. A camada superficial tem, aproximadamente, 200 metros de altura a partir da superfície (STULL, 2000). Ela é caracterizada pelo arrasto por atrito, condução de calor e evaporação da superfície, na qual os fluxos turbulentos são relativamente uniformes com a altura. É definida, então, a altura a partir da superfície onde os efeitos mecânicos predominam sobre os efeitos térmicos, como $z < |L|$, onde z é a altura acima do solo e L é o comprimento de

Monin-Obukhov, descrito por (ARYA, 1999) :

$$L = -\frac{\theta_v u_*^3 \rho_a c_p}{\kappa g H_0} \quad (1)$$

onde θ_v é a temperatura potencial virtual, u_* é a velocidade de atrito, ρ_a é a densidade do ar, c_p é o calor específico à pressão constante da atmosfera, κ é a constante de von Karman (cujo valor está entre 0,35 e 0,42, sendo 0,4 o valor mais utilizado), g é a aceleração da gravidade e H_0 é o fluxo de calor sensível.

Para definir a temperatura potencial virtual é necessário definir a temperatura potencial (θ). Esta é a temperatura de uma parcela de ar que é expandida adiabaticamente para alguma pressão de referência, dada por (ARYA, 1999):

$$\theta = T \left(\frac{P_r}{P_a} \right)^{R/c_p} \quad (2)$$

onde T é a temperatura real, P_a é a pressão do ar, P_r é uma pressão de referência e R é a constante específica do ar seco. Tem-se, então, que a temperatura potencial virtual, que é a temperatura que o ar seco deveria ter para ter a mesma densidade que o ar úmido, com a mesma pressão, é descrita como (ARYA, 1999):

$$\theta_v = \theta(1 + 0,61\alpha) \quad (3)$$

em que α é a umidade específica do ar.

O fluxo de calor sensível é obtido por (ARYA, 1999):

$$H_0 = c_p \rho \overline{w\theta_v}|_0 \quad (4)$$

em que $\overline{w\theta_v}$ é o fluxo de calor sensível virtual, e o subscrito "0" se refere às medições ou observações ao nível da superfície. E, por fim, a velocidade de atrito é definida como (ARYA, 1999):

$$u_* = \left(\frac{\tau_0}{\rho} \right)^{1/2} \quad (5)$$

onde $\tau_0 = -\rho \overline{uw}_0$ é o fluxo vertical turbulento de quantidade de movimento, tal que \overline{uw}_0 é a covariância das perturbações das componentes de velocidade u e w .

O valor absoluto do comprimento de Monin-Obukhov pode ser interpretado como a altura acima do solo em que há um equilíbrio entre produção de energia cinética pela tensão cisalhante e a produção ou dissipação da energia cinética da turbulência pelo

efeito do empuxo. Em outras palavras, é a altura na qual os efeitos de cisalhamento são significantes sob determinada condição de estabilidade. Desta forma, relaciona-se L com as condições de estabilidade da atmosfera: estável para $L > 0$, instável para $L < 0$ e neutra para $L = 0$.

Após a camada limite superficial, tem-se a camada de mistura. Sua altura está entre $|L| < z < z_i$, em que z_i é a altura da base de uma inversão. É nessa porção que ocorre a dispersão de poluentes, seja por ação térmica ou mecânica.

A terceira camada, chamada de camada interfacial ou zona de entranhamento é uma região bastante estável, com fluxo de calor negativo, e é onde há o entranhamento do ar da atmosfera livre para dentro da camada de mistura.

Ao fim da tarde, a radiação vai se tornando fraca para manter os fluxos convectivos. Portanto, começa a ser gerada uma camada com os resíduos da turbulência convectiva chamada de camada residual. É uma camada com estratificação neutra e não tem contato com a superfície. Essa última característica torna-a uma exceção no estudo da CLA, pois ela não sofre influência da superfície, sendo modificada pela evolução da camada limite estável.

A camada limite estável (CLE) é influenciada pela taxa de resfriamento radiativo e pela taxa de advecção da turbulência mecânica. Esta camada surge ao anoitecer, quando o fluxo de calor é negativo, o que significa que a atmosfera está cedendo calor para a Terra. Esta camada pode ser pouco ou muito estável dependendo do comportamento do vento e do resfriamento radiativo. A CLE muito estável é favorecida em noites em que o resfriamento radiativo é muito intenso (ausência de nuvens), em localidades baixas (para onde o ar frio se desloca) e protegidas por obstáculos (o que favorece a diminuição de vento próximo à superfície). A CLE pouco estável ocorre em situações distintas às citadas.

Grande parte da turbulência existente na CLA é gerada por forçantes como o aquecimento solar durante o período diurno. Este tipo de turbulência é chamada de turbulência térmica e está associada aos efeitos de flutuabilidade e empuxo do ar. A turbulência mecânica é originada pelo cisalhamento do vento gerado pelo atrito interno (viscosidade) do ar e pelos efeitos da interação do vento com a superfície irregular da Terra (rugosidade).

A modelagem numérica, as observações de campo e os experimentos de laboratório mostram que as duas variáveis mais importantes que controlam a turbulência na camada limite são z_i (altura da CLA) e w_* (a escala de velocidade convectiva) (DEGRAZIA *et al.*, 1992).

A escala de velocidade convectiva tem valores típicos de 2 m/s, e pode ser

parametrizada pela EQUAÇÃO (6) (ARYA, 1999):

$$w_* = \left(\frac{gH_0z_i}{\rho_a c_p T_a} \right)^{1/3} \quad (6)$$

em que g é a aceleração da gravidade, H_0 é o fluxo de calor sensível, z_i é a altura da CLA, ρ_a é a densidade do ar, c_p é o calor específico à pressão constante do ar e T_a é a temperatura do ar.

Portanto, para descrever tais características atmosféricas e relacioná-las aos estudos de dispersão de poluentes neste meio, é necessário compreender os fundamentos dos modelos de transporte advectivo e difusivo, como segue na próxima seção.

2.2 MODELOS DE TRANSPORTE ADVECTIVO E DIFUSIVO

São inúmeros os processos que governam o transporte difusivo e advectivo dos poluentes. A complexidade em descrevê-los exige a necessidade da utilização de modelos matemáticos, que se tornaram uma ferramenta indispensável para gestão ambiental, sem os quais dificilmente se teria uma visão dinâmica dos sistemas ambientais.

Um modelo de transporte atmosférico advectivo e difusivo caracteriza dois aspectos importantes sobre o comportamento de poluentes quando emitidos na atmosfera. São eles a advecção e a difusão. A advecção é o processo de transporte de uma propriedade atmosférica, somente pelo movimento da massa (como um campo de velocidade) na atmosfera (AMS, 2012). A advecção do ar poluído pelo vento médio é, preferencialmente, chamada de transporte. A difusão é o processo de mistura de propriedades de um fluido por movimentos moleculares ou turbulentos (AMS, 2012). Na modelagem de transporte advectivo e difusivo de poluentes atmosféricos, o termo dispersão é definido como a combinação entre os processos de advecção e o de difusão.

Existem diversas formas de modelar os fenômenos atmosféricos, não havendo apenas um único modelo que se aplique a todas as condições atmosféricas observadas (MOREIRA e TIRABASSI, 2004). De forma geral, os modelos são classificados como eulerianos e lagrangeanos, de acordo com o referencial adotado. Modelos lagrangeanos descrevem a trajetória de massas de ar ou de partículas individuais em um fluxo turbulento, com um sistema referencial que segue o movimento individual de cada partícula do poluente (ARBAGE *et al.*, 2006). Modelos eulerianos, por sua vez, descrevem a variação local da concentração medida em um sistema de referência fixo em relação à superfície da Terra.

Para o sistema de coordenadas euleriano, o transporte advectivo-difusivo é estudado através da equação da advecção-difusão (EQUAÇÃO (7)), que pode ser escrita com base

na lei da conservação da massa, seguindo o plano de sistemas cartesianos, sendo o eixo x coincidente à direção da velocidade média do vento, o eixo z à direção vertical e y à direção transversal:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} + W \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \pm S \quad (7)$$

onde C é a concentração do poluente, K_x , K_y e K_z são os coeficientes de difusão turbulenta nas direções x , y e z , respectivamente, U , V e W são as velocidades das componentes do vento nas direções x , y , e z . O termo S representa uma fonte ou sumidouro do poluente. Este termo é incluído na equação quando o poluente sofre transformações, sejam elas através de processos físicos, químicos ou biológicos. Nesses casos os poluentes são classificados como não conservativos. Quando o poluente é dito conservativo, ou seja, quando sua concentração permanece inerte, exceto por difusão ou advecção, o termo S é desconsiderado.

A solução da equação da advecção-difusão pode ser analítica ou numérica. A forma analítica exige simplificações na representação da variação vertical da velocidade do vento com a altura e da turbulência. A solução numérica supera essas limitações, permitindo a inclusão de perfis verticais de velocidade do vento e de difusividade turbulenta mais complexos e realísticos. Existem modelos matemáticos que consideram uma distribuição normal da concentração de poluentes, assumindo o coeficiente de difusão e a velocidade vertical do vento como constantes. Esse tipo de modelo, identificado como modelo de pluma gaussiana, é um exemplo específico de solução analítica. Apesar de muito simplificado, com base em condições idealizadas, eles têm sido amplamente aplicados, inclusive pela Agência de Proteção Ambiental Americana (CIMORELLI *et al.*, 2004).

2.3 POLUENTES EMITIDOS POR FONTES FIXAS, PONTUAIS E CONTÍNUAS

Três componentes caracterizam os problemas de poluição atmosférica: 1) as fontes de emissão; 2) a atmosfera, na qual ocorrem os processos de transporte, transformações químicas, e processos de remoção; e, 3) receptores que respondem a pequenas quantidades de poluentes atmosféricos.

As fontes de poluição podem ser classificadas como fixas ou móveis, que produzem cargas pontuais e difusas, respectivamente. A fonte fixa pode ser exemplificada como a chaminé de uma indústria, e a sua carga é considerada pontual pois é introduzida no ambiente através de lançamento individualizado. Fontes móveis, como veículos movidos à combustão, produzem uma carga difusa, por não terem um único ponto de lançamento.

As fontes podem também emitir o poluente de duas formas distintas: continuamente ou instantaneamente. A emissão de efluentes a partir de uma chaminé, por exemplo, pode ocorrer ao longo de todo o dia e/ou noite (contínua), ou pode ser somente uma emissão ocasional, ocorrendo em um intervalo curto de tempo, como a abertura de uma válvula de alívio, ou uma descarga acidental de efluente.

Os modelos de dispersão de poluentes atmosféricos podem descrever todas as fontes de poluição. No entanto, cada tipo de modelo é configurado para caracterizar quais fontes irá tratar de forma específica. O sistema MODELAR (ARMANI *et al.*, 2014), por exemplo, considera fontes fixas, pontuais e contínuas.

Analisando uma fonte fixa com emissão contínua, o efluente emitido forma o que se denomina “pluma”, como representado na FIGURA 3:

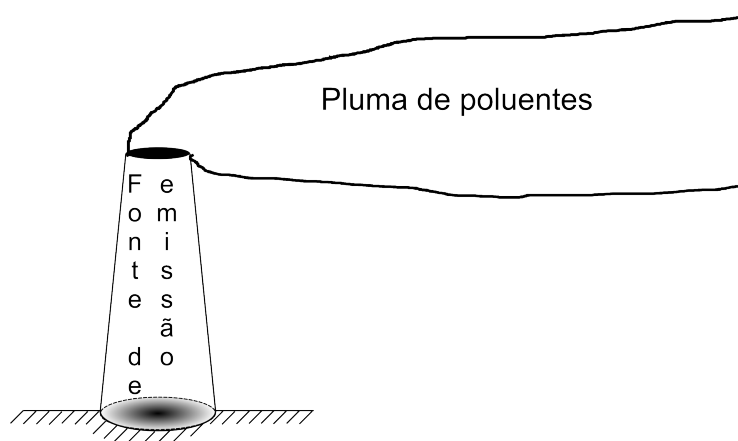


FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO DA PLUMA DE POLUENTES.

Para que um modelo possa reproduzir os efeitos de diferenças de temperatura entre a pluma de poluentes e o ambiente, assim como o gradiente de velocidade vertical entre a pluma e o ambiente, é necessário incluir um termo de “levantamento da pluma”. O levantamento de pluma de poluentes se refere à altura que a pluma de poluentes se eleva em relação à fonte de emissão, devido a esses efeitos.

2.3.1 Levantamento de pluma

Muitas fontes de poluição do ar liberam material na atmosfera com alguma quantidade de movimento vertical inicial e uma flutuabilidade positiva, as quais fazem com que a pluma liberada suba gradualmente enquanto dispersa sob a influência tanto da turbulência da fonte geradora quanto da turbulência que ocorre naturalmente (ARYA, 1999). A maioria das emissões antropogênicas na atmosfera têm temperaturas muito maiores que do ar ambiente e frequentemente tem elevadas velocidades de emissão vertical.

O levantamento de pluma pode ocorrer tanto pelo efeito de flutuabilidade, onde o

levantamento ocorre pela diferença de temperatura entre a pluma emitida e o ar ambiente, e/ou pela quantidade de movimento (*momentum*), a partir do qual o levantamento é devido à velocidade vertical de saída dos efluentes.

Modelos e teorias de levantamento de plumas foram propostos na literatura desde a metade dos anos 50. Extensivas revisões sobre isso foram feitas por Briggs (1969; 1971; 1975; 1984), Pasquill e Smith (1983), e Weil (1988), entre outros.

Existem muitos fatores que podem influenciar o levantamento da pluma (Δh). De forma geral, na literatura, os principais fatores são: a altura da chaminé (h_s) e o raio (r) de sua seção transversal interna, a velocidade de exaustão (w_s), a temperatura de emissão (T_s) e a temperatura do ambiente (T_a), a estabilidade atmosférica (podendo ser indicada pelo comprimento de Monin-Obukhov – L) e o perfil médio do vento (\bar{u}) (FIGURA 4).

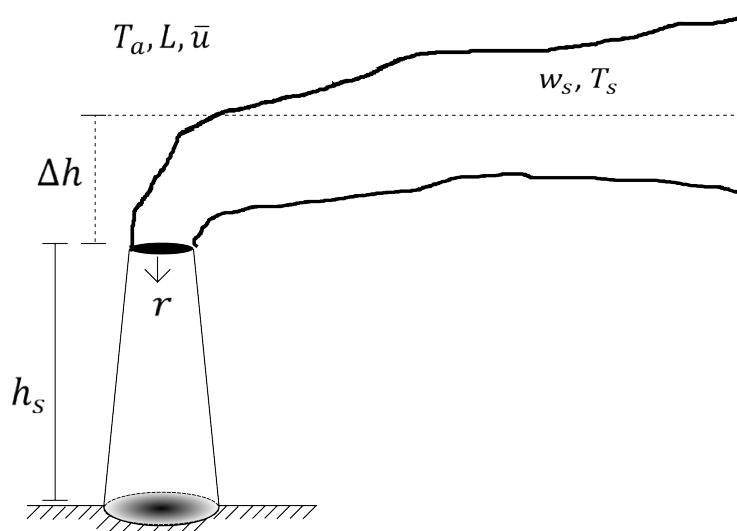


FIGURA 4 – FATORES QUE INFLUENCIAM O LEVANTAMENTO DA PLUMA DE POLUENTES.

Essa relação de dependência pode ser expressa por:

$$\Delta h = f(h_s, r, w_s, T_s, T_a, L, \bar{u}). \quad (8)$$

Além disso, deveriam-se considerar os efeitos da turbulência atmosférica. No entanto, na teoria, esses efeitos próximos à fonte de emissão são ignorados, pois se supõe que a turbulência na pluma de poluentes, na saída da chaminé, é suficientemente grande em relação à zona de diluição inicial (campo próximo) (HOULT *et al.*, 1969). Aliado a isso, outras aproximações são consideradas: a suposição de que a direção do vento é constante, as irregularidades da superfície da pluma são ignoradas, a pluma não afeta as propriedades do ambiente, a pluma é contínua e as propriedades na pluma são uniformes.

São encontradas diferentes definições de levantamento de pluma, que são adotadas de acordo com a conveniência do observador e as limitações da técnica de observação.

Por exemplo, uma definição comum para a altura efetiva da fonte é a altura da pluma em uma grande distância onde ela ainda é detectada. Isso depende do método de detecção, bem como das condições atmosféricas. Isso também ignora o fato de que, sob condições instáveis, plumas com fluabilidade podem manter a elevação além da distância na qual deixa de ser detectável pelos olhos do observador ou câmeras e que a elevação da pluma é, de fato, uma função da distância da fonte (ARYA, 1999).

Briggs (1984) propôs uma definição mais satisfatória para a altura efetiva da fonte (h_e). Esta definição consiste em determinar a altura do levantamento da pluma em função da distância x , através da EQUAÇÃO (9):

$$\Delta h = \left[\frac{3}{\beta_m} \frac{F_m}{\bar{u}^2} x + \frac{3}{2\beta_b^2} \frac{F_b}{\bar{u}^3} x^2 \right]^{1/3} \quad (9)$$

onde: $\beta_b \approx 0.6$, $\beta_m = 0,4 + 1,2\bar{u}/w_s$, mas usualmente considera-se $\beta_m = \beta_b = 0,6$ e:

$$F_b = gw_s r^2 \frac{T_s - T_a}{T_s}, \text{ e} \quad (10)$$

$$F_m = \frac{\rho_s}{\rho_a} r^2 w_s^4, \quad (11)$$

para as quais F_m é o parâmetro de quantidade de movimento, F_b é o parâmetro de fluabilidade, \bar{u} é a velocidade média do vento na saída da chaminé, x é a distância horizontal, T é a temperatura, e ρ é a massa específica, s e a são os índices que representam características da emissão e da atmosfera, respectivamente, w_s é a velocidade de emissão do efluente, r é o raio interno na saída da chaminé e g é o termo de aceleração da gravidade.

Desta forma é possível acompanhar o chamado “núcleo” da pluma (FIGURA 5). O núcleo da pluma é onde são previstas as concentrações máximas observadas na pluma. É a partir deste núcleo que se determina a elevação da pluma, seja sua altura máxima ou as elevações graduais que sofre de acordo com a distância horizontal (x).

A partir da expressão para Δh , a altura efetiva seria o valor de Δh onde a pluma se estabilizaria somada à altura da fonte de emissão.

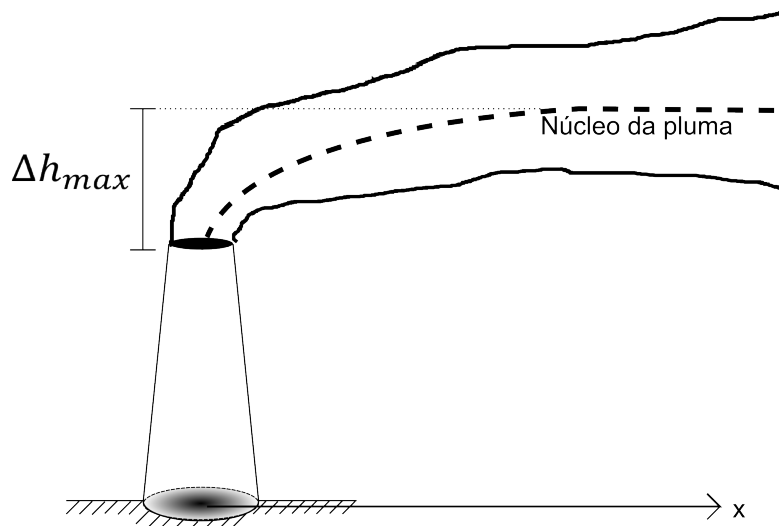


FIGURA 5 – NÚCLEO DA PLUMA DE POLUENTES (LINHA TRACEJADA).

Outra equação pode ser utilizada para delimitar diretamente a altura máxima do levantamento da pluma de poluentes, descrita pela equação iterativa de Briggs (1975), independente da distância x :

$$\Delta h_{max} = 6,25 \left(\frac{F_b}{\bar{u}w_*^2} \right) \left(1 + \frac{2h_s}{\Delta h} \right)^2 \quad (12)$$

onde F_b é o parâmetro de flutuabilidade, \bar{u} é a velocidade média do vento na saída da chaminé, w_* é a escala de velocidade convectiva e h_s é a altura da fonte de emissão.

Além destas, outras formulações encontradas na literatura que descrevem o levantamento da pluma, sendo as principais descritas no apêndice C (BEYCHOK, 2005; BRIGGS, 1965, 1975, 1984; CARSON e MOSES, 1969; CONCAWE, 1968; LUCAS *et al.*, 1963; HOULT *et al.*, 1969; MACEY, 1970; MOSES e CARSON, 1968; PERRY *et al.*, 1989; SLAWSON e CSANADY, 1967; WEIL, 1988). De acordo com Arya (1999), o levantamento da pluma não pode ser estimado com muita acurácia porque a maioria das teorias de levantamento de plumas são semi-empíricas e têm constantes ou coeficientes empíricos com grandes incertezas associadas a seus valores. Dessa forma, são estabelecidas três categorias para as diferentes aproximações:

1. fórmulas puramente empíricas desenvolvidas com base em correlações estatísticas e regressão de observações de elevação de pluma com poucos efluentes e variáveis ambientais relevantes, nas quais a maioria das constantes é restrita às suas aplicações (BRIGGS, 1969);
2. fórmulas também empíricas, mas baseadas em princípios da análise dimensional e similaridade, com constantes não empíricas (BRIGGS, 1969);

3. aproximação teórica baseada nas equações fundamentais de dinâmica dos fluidos expressando a conservação da massa, quantidade de movimento e fluidez ou energia termodinâmica para plumas flutuáveis e jatos (BRIGGS, 1975, 1984; e WEIL, 1988).

Algumas formulações são específicas para a condição de atmosfera estável, como a formulação de Carson-Moses de 1967 (CARSON e MOSES, 1969):

$$\Delta h_{max} = \left[1,22 \frac{w_s d}{\bar{u}} + 1,17 \cdot 10^{-3} \frac{Q_h^{1/2}}{\bar{u}} \right] \quad (13)$$

onde w_s é a velocidade de emissão do poluente, d é o diâmetro da chaminé, \bar{u} é a velocidade média do vento na altura de emissão e Q_h é a taxa de emissão de calor do efluente.

Em geral, utiliza-se o cálculo da altura efetiva da pluma ($h_e = h_s + \Delta h_{max}$). Por meio de equações simples, é calculado o valor de Δh_{max} e a altura efetiva é inserida no modelo como parâmetro de entrada. No entanto, esta abordagem possui limitações, pois é desconsiderada a elevação gradual da pluma de poluentes logo após sua saída da chaminé, ou seja, não se calcula a variação da pluma ao longo da distância x .

3 METODOLOGIA

Para aplicar o levantamento de pluma é necessário determinar quais são as metodologias possíveis de serem empregadas no MODELAR, verificando se há concordância entre os resultados obtidos através de diferentes formulações. Além disso, é recomendado averiguar quais as formulações que têm sido implementadas em outros modelos de dispersão atmosférica.

Neste trabalho a metodologia será aplicada a cada passo no espaço da solução numérica, a fim de acompanhar o levantamento da pluma através da sua trajetória.

Para validar a metodologia será utilizado o experimento de campo de Indianápolis, Estados Unidos (HANNA *et al.*, 2005). Os experimentos são separados de acordo com a estabilidade atmosférica em instáveis ($L < 0$) e estáveis ($L > 0$).

As previsões de concentrações obtidas por esta metodologia serão analisadas estatisticamente e comparadas com resultados obtidos a partir de outros modelos de dispersão atmosférica. Além disso, é realizada uma análise de sensibilidade para os parâmetros u_* e z_i afim de verificar a influência destes sobre as previsões do modelo de dispersão.

3.1 O MODELAR

O sistema MODELAR é formado pelo modelo de dispersão próprio para ser empregado como modelo regulatório de qualidade do ar para o estado do Paraná, além de possuir uma interface gráfica e uma base de dados micrometeorológicos (ALMEIDA *et al.*, 2011; ARMANI *et al.*, 2014). Foi desenvolvido pelo grupo de pesquisa do LEMMA (Laboratório de Estudos em Monitoramento e Modelagem ambiental) para a previsão de concentrações de poluentes atmosféricos, em um domínio bidimensional, geradas a partir de emissões de fontes estacionárias pontuais contínuas (ALMEIDA *et al.*, 2011; ARMANI, 2011; ARMANI *et al.*, 2014; CONTE, 2013). Ainda em fase de desenvolvimento, este sistema também pretende ser uma plataforma para o desenvolvimento científico, e para atender a propósitos acadêmicos.

Os dados micrometeorológicos foram produzidos por regionalização dinâmica de dados do projeto *Reanalysis* para o estado do Paraná (KISTLER *et al.*, 2001), com representatividade estatística equivalente a 3 anos, com amostras de 36 meses selecionados aleatoriamente entre 1960 e 2010. A interface gráfica permite ao usuário informar os parâmetros de entrada para que ele obtenha resultados de concentrações integradas e de forma organizada. Este modelo é capaz de simular fontes antropogênicas pontuais e descreve o transporte dos poluentes com base na geração da turbulência por

efeitos térmicos e mecânicos (ALMEIDA *et al.*, 2011; ARMANI *et al.*, 2014).

Para validar o modelo numérico, em condições sem levantamento de pluma, foram utilizados dois experimentos de campo: Copenhagen (GRYNING e LYCK, 2002; OLESEN, 2005) e Projeto Prairie Grass (BARAD, 1958). Os dados obtidos pelos experimentos de campo foram comparados aos dados simulados pelo modelo e com o cálculo de índices estatísticos, demonstrou-se que o MODELAR é comparável a modelos internacionalmente recomendados, como o AERMOD (ARMANI, 2011; ARMANI *et al.*, 2014; CIMORELLI *et al.*, 2004).

A grande vantagem do modelo numérico implementado é a diminuição do custo computacional necessário para a obtenção de previsões de concentração. Como solução, o modelo gera resultados na forma de concentrações normalizadas (Concentração/Taxa de emissão: s/m²).

3.1.1 Equações características

Como equação base para o sistema MODELAR é utilizada a equação da advecção-difusão simplificada para condições de estacionariedade ($\partial\bar{C}/\partial t = 0$). Para a solução são negligenciados os termos de difusão longitudinal e transversal e o sistema de coordenadas tem o eixo x coincidindo com a direção da velocidade média do vento e o eixo z está na direção vertical, como utilizado por Wortmann *et al.* (2004):

$$\bar{U} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = K_z \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial z^2} + \left(\frac{\partial K_z}{\partial z} \right) \frac{\partial \bar{C}}{\partial z}. \quad (14)$$

A difusividade turbulenta na direção vertical z é representada por K_z , \bar{U} é o perfil da velocidade média do vento na direção longitudinal x e \bar{C} é a concentração integrada na direção normal ao vento em (y). Os poluentes simulados são tratados como conservativos ($S = 0$). Como condições de contorno considera-se fluxo zero na superfície e no topo da CLA:

$$K_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = 0 \text{ em } z = 0, h \quad (15)$$

e a taxa de emissão da fonte (Q) na altura (h_s) é representada pela função Delta de Dirac (δ):

$$\bar{U}\bar{C}(0, z) = Q\delta(z - h_s) \text{ em } x = 0. \quad (16)$$

A parametrização da difusividade turbulenta vertical em atmosfera instável ($L < 0$) é descrita pela EQUAÇÃO (17) (DEGRAZIA *et al.*, 1997):

$$K_z = 0,22w_*h(z/h)^{1/3} \left(1 - \frac{z}{z_i}\right)^{1/3} \left[1 - \exp\left(-4\frac{z}{z_i}\right) - 0,0003 \exp\left(8\frac{z}{z_i}\right)\right] \quad (17)$$

e para condições neutra e estável ($L \geq 0$) a parametrização é dada pela EQUAÇÃO (18) (DEGRAZIA *et al.*, 2000):

$$K_z = \frac{0,4 \left(1 + 3,7\frac{z}{\Lambda}\right)^{1/3} u_* z}{\left(1 + 15\frac{fz}{u_*0} + 3,7\frac{z}{\Lambda}\right)^{4/3}} \quad (18)$$

nas quais z_i é a espessura da camada limite estável, $\Lambda = L(1 - z/h)^{5/4}$ e f é o parâmetro de Coriolis.

As concentrações obtidas pelo modelo são distribuídas na direção transversal, ao nível da superfície pela EQUAÇÃO (19) (GRYNING *et al.*, 1987):

$$C(x, y, 0) = \frac{\bar{C}(x, 0)}{(2\pi)^{1/2}\sigma_y} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right), \quad (19)$$

em que $C(x, y, 0)$ é a concentração na posição (x, y) e ao nível da superfície, $\bar{C}(x, 0)$ é a concentração integrada na direção transversal ao vento, também na superfície, y é a direção transversal e σ_y é o parâmetro de dispersão da pluma na direção transversal ao vento.

A parametrização do perfil vertical médio do vento para o MODELAR é descrita pela EQUAÇÃO (20) de Panofsky e Dutton (1988):

$$\bar{U} = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \frac{z}{z_0} - \Psi_m \left(\frac{z}{L} \right) \right] \quad (20)$$

onde u_* é a velocidade de atrito (EQUAÇÃO (5)), κ é a constante de von Karman e Ψ_m é a função de estabilidade expressa pelas relações de Businger:

para $1/L \geq 0$:

$$\Psi_m = \left(\frac{z}{L} \right) = -4,7\frac{z}{L} \quad (21)$$

para $1/L < 0$:

$$\Psi_m \left(\frac{z}{L} \right) = \ln \left(\frac{1+x^2}{2} \right) + \ln \left(\frac{1+x}{2} \right)^2 - 2 \arctan x + \frac{\pi}{2} \quad (22)$$

com

$$x = \left(1 - 15 \frac{z}{L}\right)^{1/4}. \quad (23)$$

3.1.2 Modelo numérico

São dois os métodos numéricos utilizados para a solução do modelo: o método das aproximações sucessivas e o método trapezoidal implícito. O primeiro é utilizado para a determinação dos parâmetros que definem os perfis de vento e temperatura na camada limite superficial quando não se possuem as variáveis micrometeorológicas (fluxos), e o segundo, para a solução da equação governante do processo de dispersão (EQUAÇÃO (7)).

Para discretizar a EQUAÇÃO (14) pelo método trapezoidal implícito, define-se k para indexação na vertical e Δz para representar os espaçamentos de grade nessa direção. Na horizontal a indexação é dada por i e os espaçamentos de grade são representados por Δx . A discretização é dada por:

$$U(k) \left[\frac{C(i+1, k) - C(i, k)}{\Delta x} \right] = K_z(k) \left[\frac{C(i+1/2, k+1) - 2C(i+1/2, k) + C(i+1/2, k-1)}{\frac{\Delta z(k+1)^2 + \Delta z(k)^2}{2}} \right] + \left[\frac{K_z(k+1) - K_z(k-1)}{\Delta z(k+1) + \Delta z(k)} \right] \left[\frac{C(i+1/2, k+1) - C(i+1/2, k-1)}{\Delta z(k+1) + \Delta z(k)} \right]. \quad (24)$$

Substituindo:

$$C(i+1/2, k) = \frac{C(i+1, k) + C(i, k)}{2}. \quad (25)$$

O método resolve a equação por colunas (direção z), começando na coluna imediatamente após a fonte, a qual é composta por zeros e pela taxa de emissão no ponto da grade referente à emissão da fonte. Utiliza-se o método TDMA (*TriDiagonal Matrix Algorithm*) para a solução das equações ao longo da coluna do domínio (FORTUNA, 2000). As condições de contorno na fronteira inferior (z_0) e superior (h) são de fluxo zero:

$$K_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = 0. \quad (26)$$

Faz-se $C(i, 0) = C(i, 1)$ e $C(1, h) = C(i, h - 1)$, onde h é o índice que representa o

topo da CLA. Conseqüentemente, a primeira e a última linha de grade tem um gradiente de concentração resultando em zero:

$$\frac{C(z + \Delta z) - C(z)}{\Delta z} = 0. \quad (27)$$

A estrutura vertical do modelo é definida arbitrando o valor da altura do primeiro nível do modelo a partir da superfície (ϑ) e do espaçamento de grade no topo do modelo (ι). Com isso, o modelo distribui os espaçamentos de grade entre os demais níveis com uma função logarítmica da altura. Este procedimento gera uma grade mais refinada nos níveis inferiores, garantindo maior detalhamento desta região, em que ocorrem os maiores gradientes verticais das variáveis. As equações para os espaçamentos de grade na vertical são:

$$a = \vartheta - b \log(\vartheta) \quad (28)$$

$$b = \frac{\vartheta - \iota}{\log(\vartheta/h)} \quad (29)$$

$$\Delta z(k) = a + b \log(z(k)). \quad (30)$$

A estrutura horizontal do modelo é distribuída em pontos de grade uniforme. Dessa forma é necessário informar o comprimento do domínio e o espaçamento de grade horizontal.

O usuário tem duas possibilidades diferentes de entrar com os dados meteorológicos processados. A primeira é informando o comprimento de Monin-Obukhov, a altura da CLA, a velocidade de atrito, a temperatura ambiente e a velocidade e direção do vento. A segunda opção é informando os dados meteorológicos de superfície: vento em uma altura, temperatura do ar em dois níveis e a umidade do ar, também em dois níveis.

Para aplicação do modelo de dispersão é necessário que seja informada a altura da fonte de emissão, a taxa de emissão e a rugosidade aerodinâmica da superfície. O usuário terá a opção para ativar ou não o levantamento de pluma. Caso a opção seja empregada, deverá ser informada, além dos parâmetros anteriores, a temperatura de emissão, a velocidade de emissão e o raio da fonte (na saída da emissão).

3.2 EXPERIMENTO DE INDIANÁPOLIS

O experimento de Indianápolis é um estudo envolvendo traçadores de SF_6 em que ocorre o levantamento de pluma. Este estudo foi realizado em Indianápolis, Indiana, Estados Unidos, a partir de emissões de poluentes por uma chaminé de 83,8 metros de altura e com 2,36 metros de raio. A chaminé está localizada na planta térmica de “Perry K”, que está inserida em um complexo industrial, com muitas construções dentro de uma distância de 1 a 2 quilômetros da chaminé (FIGURA 6). De acordo com experimentos, o comprimento de rugosidade de 1 metro foi adotado para parametrizar os efeitos das construções sob a camada limite.

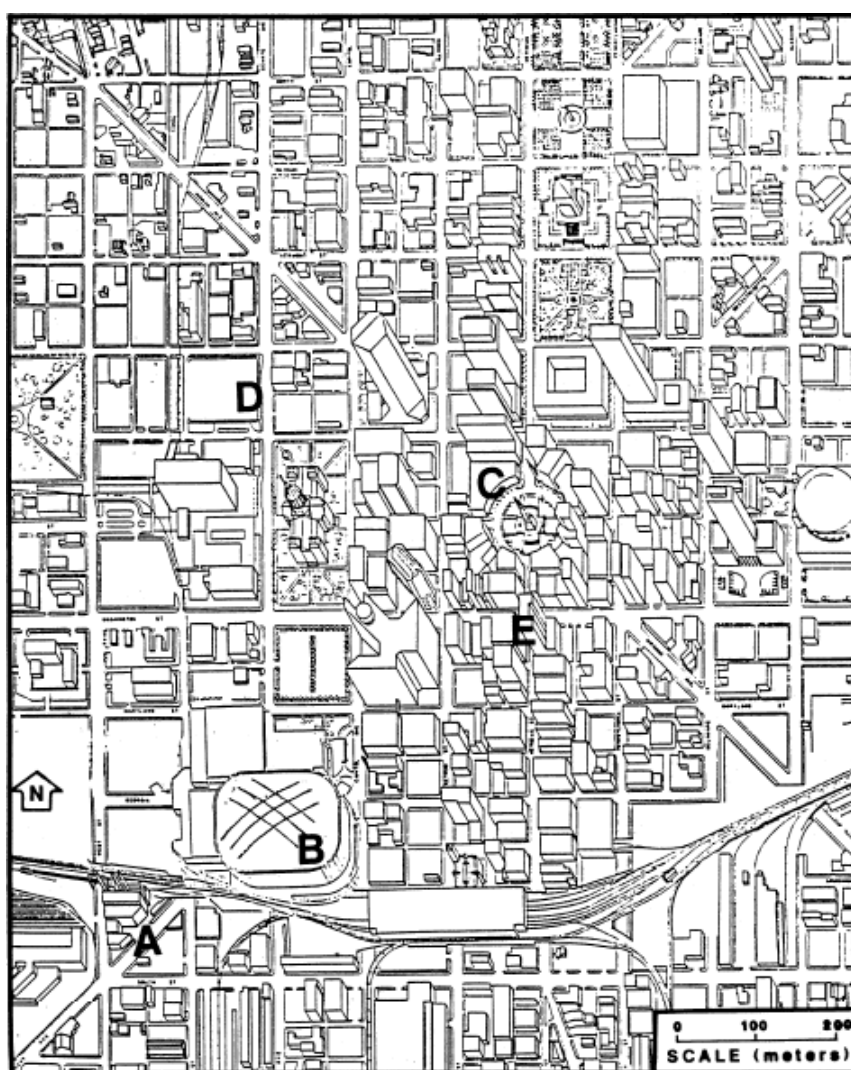


FIGURA 6 – MAPA MOSTRANDO A LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DE PERRY-K (A), O ESTÁDIO HOOSIER DOME SPORT (B), E O DISTRITO COMERCIAL CENTRAL DE INDIANÁPOLIS (C). EM (D) ESTÁ LOCALIZADA A ESTAÇÃO METEOROLÓGICA CENTRAL DE SUPERFÍCIE DE INDIANÁPOLIS, E A ESTAÇÃO “BANK TOWER” ESTÁ NO TOPO DO PRÉDIO EM (E). FONTE: TRC (1986).

As observações meteorológicas foram tomadas a partir de 94 metros de altura no topo

de um prédio no meio da área urbana, e a partir de torres de 10 metros no meio urbano, suburbano, e em localização rural (OLESEN, 2005). Nas estações urbanas a medida da maioria das variáveis foi a 11 metros de altura (OLESEN, 2005). Perfis verticais foram obtidos a partir de minisondas e sondas acústicas (OLESEN, 2005) (FIGURA 7).

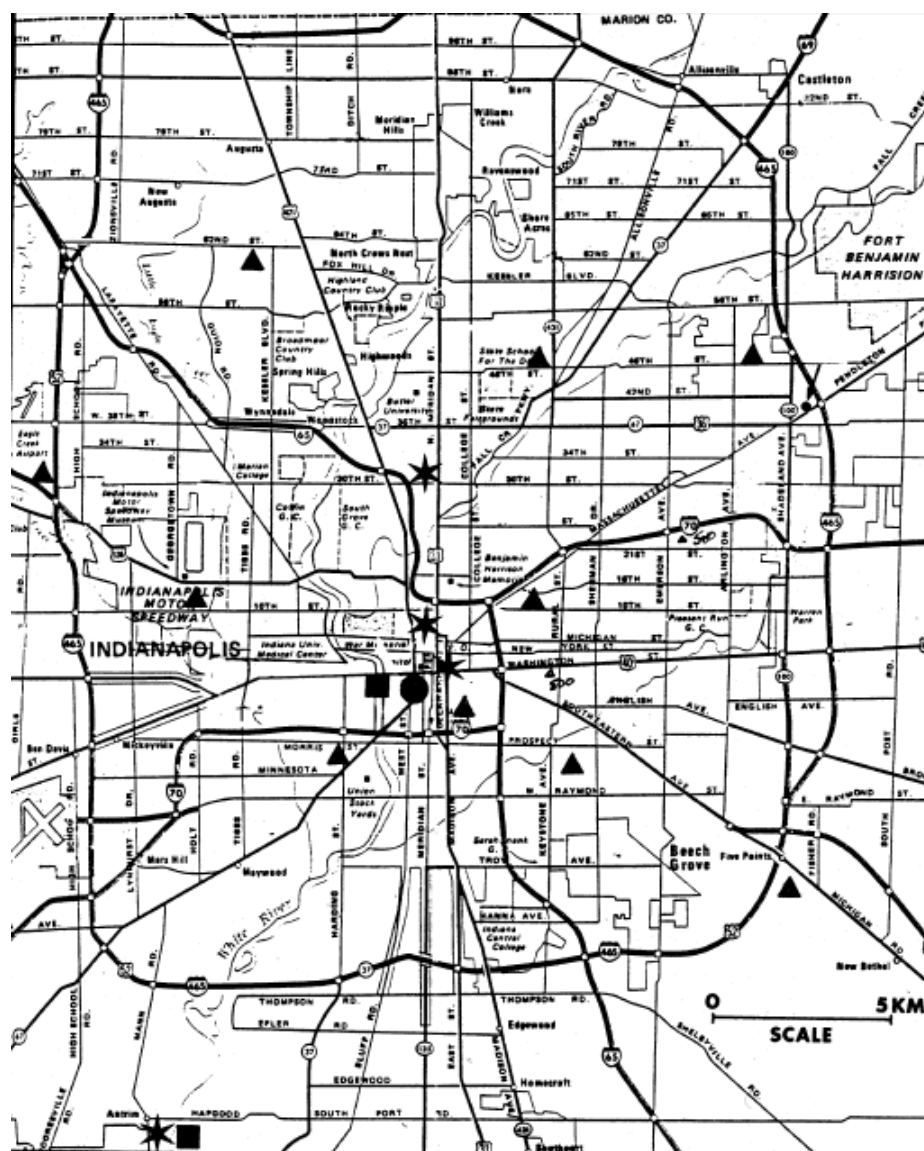


FIGURA 7 – LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES METEOROLÓGICOS. O CÍRCULO PREENCHIDO É A ESTAÇÃO DE PERRY-K. OS TRIÂNGULOS SÃO MEDIDAS DE TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE. OS ASTERISCOS SÃO ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS PRIMÁRIAS. OS QUADRADOS SÃO ESTAÇÕES DE LANÇAMENTO DE RADIOSSONDAS. FONTE: TRC (1986).

As concentrações foram observadas em uma rede de cerca de 160 monitores ao nível da superfície em arcos com distâncias entre 0,25 a 12,0 km da fonte de emissão (OLESEN, 2005). Foram coletados dados de 171 horas de observação, entre o período de 16 de setembro de 1985 a 12 de outubro de 1985.

3.2.1 Seleção dos dados

Os experimentos para validação foram selecionados de acordo com a altura da camada limite atmosférica e o comprimento de Monin-Obukhov, buscando atender todas as condições distintas do estudo.

Foram utilizados os dados dos experimentos apresentados na TABELA 1 para os casos com $L < 0$, com as condições meteorológicas e de emissão especificadas:

TABELA 1 – DADOS METEOROLÓGICOS E DE EMISSÃO UTILIZADOS PARA OS EXPERIMENTOS INSTÁVEIS ($L < 0$).

Exp.	Data	Hora	Q (g/s)	T_a (°C)	u (m/s)	P (mb)	L (m)	u_* (m/s)	z_i (m)	T_s (°C)	w_s (m/s)
1	04/10/85	10h00	4,66	14,13	4,43	980,9	-902,4	0,776	600	219,97	9,25
2	03/10/85	10h00	4,66	12,14	1,18	991,0	-8,1	0,295	800	217,63	9,29
3	03/10/85	11h00	4,67	13,57	1,58	990,7	-14,4	0,372	1000	217,91	7,66
4	17/09/85	11h00	4,66	21,41	2,64	992,4	-50,2	0,533	1200	225,51	9,63
5	19/09/85	14h00	4,66	26,72	3,02	996,1	-66,4	0,600	1500	221,88	9,21
6	20/09/85	10h00	4,65	21,47	1,84	994,6	-25,0	0,396	1600	217,41	8,52
7	19/09/85	10h00	4,66	22,08	1,86	998,5	-27,0	0,415	1600	211,15	8,32
8	20/09/85	11h00	4,66	23,57	2,30	994,6	-39,9	0,483	1600	218,17	8,52
9	19/09/85	12h00	4,67	24,72	2,63	997,8	-48,4	0,535	1600	213,86	8,29
10	21/09/85	17h00	4,65	26,55	3,04	987,6	-107,0	0,577	1800	222,49	7,72
11	19/09/85	11h00	4,67	23,62	2,43	998,5	-42,5	0,500	1900	213,29	8,33

Para avaliar os casos estáveis ($L > 0$) serão utilizados os dados de emissão e meteorológicos apresentados na TABELA 2:

TABELA 2 – DADOS METEOROLÓGICOS E DE EMISSÃO UTILIZADOS PARA OS EXPERIMENTOS ESTÁVEIS ($L > 0$).

Exp.	Data	Hora	Q (g/s)	T_a (°C)	u (m/s)	P (mb)	L (m)	u_* (m/s)	z_i (m)	T_s (°C)	w_s (m/s)
1	12/10/85	04h00	4,66	17,64	2,65	987,6	320,3	0,441	250	212,27	8,47
2	12/10/85	03h00	4,66	17,35	2,73	988,2	319,9	0,441	250	216,75	9,030
3	11/10/85	02h00	4,66	12,95	2,15	991,2	193,8	0,346	250	215,65	11,02
4	11/10/85	04h00	4,66	12,55	2,34	990,9	215,6	0,365	250	215,25	11,01
5	12/10/85	01h00	4,66	16,95	1,48	989,2	64,3	0,198	250	216,05	8,58
6	01/10/85	04h00	4,66	6,75	1,87	992,2	50,0	0,245	1200	222,55	13,78
7	17/09/85	13h00	4,66	24,15	3,32	990,2	247,3	0,530	1400	224,75	10,47
8	29/09/85	08h00	4,67	12,15	2,44	995,9	116,1	0,355	1500	221,15	10,73
9	10/10/85	04h00	4,66	17,18	2,35	991,9	219,8	0,366	1500	215,10	9,98
10	24/09/85	19h00	4,65	15,45	2,49	992,0	110,4	0,367	1800	219,75	7,77
11	26/09/85	23h00	4,67	12,75	1,98	986,0	64,4	0,264	2000	217,15	14,42

Esses dados foram obtidos a 11 metros de altura em relação à superfície, de acordo com Olesen (2005). Foram selecionados experimentos em que não existiam dados

faltantes, e que atendessem à condição de qualidade mais elevada, mencionada no descritivo do experimento de Indianápolis (HANNA *et al.*, 2005).

Todos os dados estão disponíveis para *download* através do DAM (*Datasets for Atmospheric Modelling*), em <<http://rem.jrc.ec.europa.eu/dam/>>.

3.3 IMPLEMENTAÇÃO DO LEVANTAMENTO DA PLUMA

Para determinar a formulação a ser aplicada no sistema MODELAR foi verificada a concordância entre diferentes formulações descritas na literatura (CARSON e MOSES, 1969; DEGRAZIA *et al.*, 1992; LUCAS *et al.*, 1963; HOULT *et al.*, 1969; T.V.A., 1968), que podem ser encontradas no ANEXO 1.

A TABELA 3 apresenta os valores da altura do levantamento da pluma (Δh_{max}) obtidos para os casos de atmosfera instável, e a TABELA 4, para os casos de atmosfera estável.

TABELA 3 – Δh_{max} (metros) PARA CASOS INSTÁVEIS EM DIFERENTES FORMULAÇÕES.

Exp. \ Ref.	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)
1	25,69	14,82	163,14	1,63	0,01	0,03	-12,62	-0,74	304,87
2	166,90	56,26	617,79	9,71	0,08	0,20	-47,75	-2,68	679,99
3	83,37	34,36	449,46	7,42	0,06	0,15	-29,11	-1,60	503,71
4	72,86	31,69	380,26	5,86	0,05	0,12	-26,90	-1,51	461,93
5	42,26	21,61	235,33	3,80	0,03	0,08	-18,34	-1,03	369,28
6	76,71	32,80	385,74	5,82	0,05	0,12	-27,85	-1,57	478,25
7	55,85	26,24	307,86	4,81	0,04	0,10	-22,27	-1,25	416,25
8	50,04	24,29	290,63	4,61	0,04	0,10	-20,61	-1,15	393,51
9	32,73	17,99	230,38	3,24	0,03	0,07	-15,28	-0,86	331,46
10	55,04	25,84	272,08	4,26	0,04	0,09	-21,94	-1,24	420,62
11	44,38	22,33	268,09	4,33	0,04	0,09	-18,94	-1,05	419,98

(a) Fórmula de Davidson-Bryant de 1949 (EQUAÇÃO (38)) (T.V.A., 1968)

(b) Fórmula de Holland (EQUAÇÃO (39)) (T.V.A., 1968)

(c) Fórmula de Stumke (EQUAÇÃO (40)) (CARSON e MOSES, 1969)

(d) Fórmula de Lucas-Moses-Spurr de 1963 (EQUAÇÃO (41)) (LUCAS *et al.*, 1963)

(e) Fórmula de Rauch (EQUAÇÃO (42)) (CARSON e MOSES, 1969)

(f) Fórmula de Stone-Clark de 1967 (EQUAÇÃO (43)) (CARSON e MOSES, 1969)

(g) Fórmula de Carson-Moses de 1967 (EQUAÇÃO (44)) (CARSON e MOSES, 1969)

(h) Fórmula de Moses-Carson de 1968 (EQUAÇÃO (47)) (CARSON e MOSES, 1969)

(i) Fórmula de Houyoux de 1998 (EQUAÇÃO (54)) (HOUYOUX, 1998)

TABELA 4 – Δh_{max} (metros) PARA CASOS ESTÁVEIS EM DIFERENTES FORMULAÇÕES.

Exp. \ Ref.	(a)	(b)	(c)
1	18,99	-15,15	103,00
2	25,05	-20,29	878,00
3	18,77	-14,57	1064,00
4	18,85	-14,83	816,00
5	43,30	-35,36	692,00
6	19,61	-15,71	103,00
7	42,74	-35,00	1188,00
8	26,08	-20,88	878,00
9	30,16	-24,56	103,00
10	27,70	-22,53	103,00
11	34,08	-27,81	103,00

(a) Fórmula de Carson-Moses de 1967 (EQUAÇÃO (46)) (CARSON e MOSES, 1969)

(b) Fórmula de Moses-Carson de 1968 (EQUAÇÃO (47)) (CARSON e MOSES, 1969)

(c) Fórmula de Weil de 1979 (EQUAÇÃO (58)) (DEGRAZIA et al., 1992)

Observa-se que os resultados obtidos para diferentes formulações são bastante divergentes entre si. Um dos fatores é devido à base empírica de cada fórmula, o que a torna particular para uma situação específica. Analisou-se, então, quais seriam as fórmulas utilizadas em outros modelos de dispersão.

Os métodos de levantamento de pluma sugeridos por Briggs (1975; 1984) são incorporados em muitos dos modelos preferidos e recomendados em aplicações de modelagem (EPA, 2005). Alguns dos modelos que utilizam tais formulações são (EPA, 2005): AERMOD (CIMORELLI *et al.*, 2004), CTDMPLUS, CALPUFF e ISC3.

As formulações de Briggs (1975; 1984) são as únicas que descrevem o levantamento da pluma de poluentes em função da distância x , enquanto as demais calculam apenas o Δh final, e são incorporadas no modelo através do cálculo da altura efetiva da fonte. Desta forma optou-se por aplicar a formulação de Briggs de 1984 (EQUAÇÃO (9)).

Esta fórmula permite o cálculo do levantamento da pluma de acordo com a variação da distância horizontal. A proposta é demonstrar o comportamento do levantamento da pluma a cada passo da solução, sem desprezar os efeitos na proximidade da fonte.

Para esse procedimento considera-se que o poluente é emitido em uma altura h_s , em um ponto de grade vertical z (FIGURA 8).

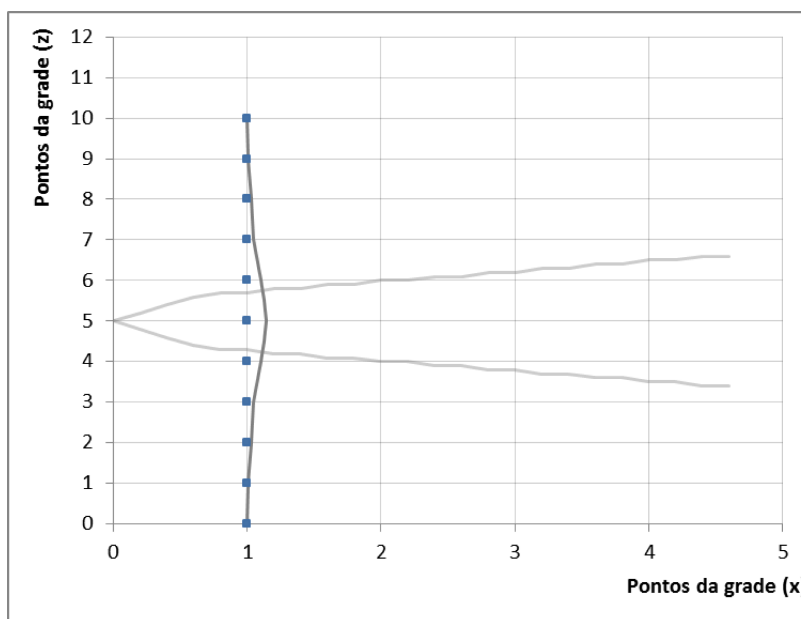


FIGURA 8 – PLUMA EMITIDA A PARTIR DA ALTURA h_s , NA GRADE DO MODELO.

A partir de então o Δh é calculado a cada passo em x (FIGURA 9), e será denominado $\Delta h'$, por representar o levantamento a cada passo da solução numérica.

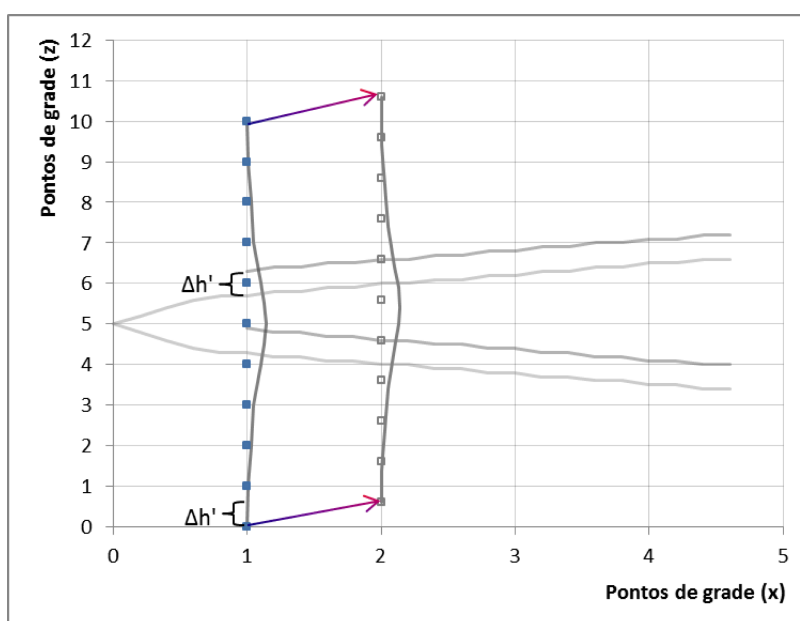


FIGURA 9 – CÁLCULO DO $\Delta h'$ NO PRIMEIRO PASSO DA SOLUÇÃO NUMÉRICA.

Cada um desses ajustes é realizado respeitando o fluxo nulo (EQUAÇÃO (26)) e deve ser utilizada a integral da concentração ao longo de z sendo igual à taxa de emissão para ajustar eventuais variações de massa do poluente. Para isso é necessário calcular um fator de correção através de:

$$fator = \frac{Q}{\text{fluxo de massa integrada ao perfil}} \quad (31)$$

onde Q é a taxa de emissão do efluente.

Este fator é, então, multiplicado pela concentração em cada nível. Verificou-se que os erros na conservação da massa em cada passo eram menores que 1% antes da aplicação da correção.

Esta metodologia, através da formulação de Briggs de 1984, permite que a pluma vá se elevando indefinidamente. Para delimitar a altura máxima que a pluma atinge utiliza-se a fórmula iterativa dada por Briggs de 1975 (EQUAÇÃO(12)). Desta forma é possível obter a altura máxima atingida pela pluma.

Será avaliada a metodologia para os casos sem a utilização da interrupção do levantamento da pluma, e a metodologia com a interrupção do levantamento da mesma.

3.4 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

Para validar as simulações do sistema MODELAR (ARMANI *et al.*, 2014) com o novo módulo de levantamento de pluma foram utilizados parâmetros estatísticos largamente empregados na literatura (COX e TIKVART, 1990; HANNA, 1989; HANNA *et al.*, 1991; HANNA *et al.*, 2001). São eles: o erro médio quadrático normalizado (*normalized mean square error* - NSME), o fator de 2 (FA2), a correlação de Pearson (R), o desvio fracional (*fractional bias* - FB), a variância geométrica (VG) e o desvio médio geométrico (*geometric mean bias* - MG) (HANNA, 1989; HANNA *et al.*, 1991; HANNA *et al.*, 2001), descritos através das seguintes equações:

$$NMSE = \overline{(C_o - C_p)^2} / \bar{C}_o \bar{C}_p \quad (32)$$

$$FA2 = \text{fração dos dados para } 0,5 \leq (C_p/C_o) \leq 2,0 \quad (33)$$

$$R = \overline{(C_o - \bar{C}_o)(C_p - \bar{C}_p)} / \sigma_o \sigma_p \quad (34)$$

$$FB = (\bar{C}_o - \bar{C}_p) / 0,5(\bar{C}_o + \bar{C}_p) \quad (35)$$

$$VG = \exp \left[\overline{(\ln C_o - \ln C_p)^2} \right] \quad (36)$$

$$MG = \exp(\overline{\ln C_o - \ln C_p}) \quad (37)$$

onde C representa as concentrações, σ o desvio padrão e os índices o e p os valores observados e previstos, respectivamente.

O NMSE expressa os desvios entre as concentrações, indicando erros sistemáticos e aleatórios. O fator de 2 descreve o percentual de valores que se encontram dentro do intervalo correspondente a metade da concentração observada até o dobro dela. A correlação de Pearson informa o grau de concordância entre os dados previstos e observados. O FB representa a tendência do modelo em superestimar (valor negativo) ou subestimar (valor positivo) as concentrações observadas.

Para que um modelo seja ideal e represente fielmente as condições observadas, espera-se que $MG = VG = R = 1$, e $FB = NMSE = 0$ (HANNA, 1989; HANNA *et al.*, 1991; HANNA *et al.*, 2001).

Hanna *et al.* (2004) concluíram que para o desempenho aceitável de modelos de dispersão os valores das estatísticas calculadas devem estar entre as seguintes faixas de valores: $FA2 > 0,5$, $-0,3 < FB < 0,3$ ou $0,7 < MG < 1,3$, $NMSE < 4$ ou $VG < 1,6$. Esses valores são uma referência, mas devem-se observar todos os resultados das estatísticas para se avaliar o modelo.

Para comparar o desempenho do modelo entre as versões com e sem a interrupção do levantamento da pluma optou-se por utilizar o método de reamostragem de *Bootstrap*, como sugerido por Hanna (1988).

A reamostragem de *Bootstrap* exige como entrada uma tabela ou matriz de N concentrações previstas e observadas. Calcula-se o parâmetro estatístico pretendido para os dados de entrada. São então criadas B novas amostras para as concentrações previstas e observadas, respectivamente, a partir do embaralhamento aleatório das amostras originais. O valor de B é tipicamente entre 50 e 500 (ASTM, 2010). Para cada amostra aleatória recalcula-se o parâmetro desejado. Uma matriz com todos os B valores dos parâmetros é criada. Cada amostra do método de *Bootstrap* gera uma diferença Δ entre o desempenho estatístico de cada versão do modelo. Calcula-se a média ($\bar{\Delta}$) e o desvio padrão (σ_{Δ}) para se obter o valor t , sendo $t = \bar{\Delta}/\sigma_{\Delta}$. Com base na distribuição t de *Student*, para os valores de $|t|$ maiores que 1,645 pode-se concluir com 90% de confiança que há uma diferença significativa entre os dois modelos para o parâmetro estatístico testado.

3.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade do modelo foi realizada a partir dos dados dos experimentos estáveis, para poder entender a influência de dois parâmetros importantes na modelagem de dispersão atmosférica: u_* (velocidade de atrito) e z_i (altura da camada limite atmosférica). Os demais parâmetros não serão analisados por não serem tão relevantes quanto estes dois parâmetros (CONTE, 2013).

Para esta análise foram consideradas as variações de cada um dos parâmetros em +20%, -20%, +50% e -50% em relação ao valor observado. Para cada variação no valor de um parâmetro, todos os demais permanecem inalterados.

Desta forma, em cada um dos testes são recalculadas as estatísticas, sem reamostragem de *Bootstrap*. Estas são comparadas através de gráficos, para que possa ser avaliada a sensibilidade de cada índice estatístico em relação às variações dos parâmetros modificados.

4 RESULTADOS

Os experimentos de Indianápolis foram simulados através do sistema MODELAR com o novo módulo de levantamento de pluma. Os resultados aqui apresentados estão separados de acordo com a condição de estabilidade atmosférica, através do comprimento de Monin-Obukhov: casos instáveis para $L < 0$ e casos estáveis para $L > 0$.

4.1 CASOS INSTÁVEIS

Cada experimento escolhido (TABELA 1) foi simulado para duas condições distintas: 1) ps: pluma sem interrupção do levantamento e 2) pc: pluma com interrupção do levantamento. Essas condições representam a pluma elevando-se sem que tenha seu levantamento interrompido (EQUAÇÃO (9)), e a situação em que limita-se a altura máxima que a pluma deve subir, através da formulação de Briggs (1975) (EQUAÇÃO (12)).

A Tab. 5 mostra os valores das concentrações observadas e previstas para a distância x . Essas distâncias se referem ao local onde a concentração observada foi medida nos experimentos de Indianápolis.

TABELA 5 – CONCENTRAÇÕES OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE, INTEGRADAS E NORMALIZADAS (C_o^y/Q); CONCENTRAÇÕES PREVISTAS NA SUPERFÍCIE, INTEGRADAS E NORMALIZADAS SEM INTERRUPTÃO DO LEVANTAMENTO DA PLUMA (C_{ps}^y/Q) E COM INTERRUPTÃO DO LEVANTAMENTO DA PLUMA (C_{pc}^y/Q).

Exp.	x (km)	C_o^y/Q ($10^{-4}s/m^2$)	C_{ps}^y/Q ($10^{-4}s/m^2$)	C_{pc}^y/Q ($10^{-4}s/m^2$)
1	1,0	1,41	0,05	0,05
	1,5	2,47	0,18	0,18
2	4,0	1,66	2,73	7,61
	6,0	1,47	2,76	7,62
3	1,0	0,90	3,23	4,59
	1,5	2,34	3,81	5,11
	2,0	6,18	4,03	5,05
	3,0	7,49	4,20	4,85
	4,0	8,61	4,28	4,75
	6,0	10,25	4,32	4,70
	10,0	8,16	4,33	4,69
4	0,5	0,31	0,58	0,58
	0,75	0,94	0,91	0,91
	4,0	5,85	2,28	2,54
5	0,75	1,92	1,64	1,64
	1,0	2,48	1,95	1,95
	1,5	3,09	2,31	2,54
	3,0	2,29	2,57	2,73
	4,0	1,82	2,54	2,46
	6,0	1,32	2,40	2,04
6	1,0	1,47	1,66	1,58
	1,5	4,96	2,05	3,70
	2,0	6,99	2,27	3,69
7	0,75	1,06	3,11	3,11
	1,0	2,16	3,44	3,78
	1,5	5,11	3,76	4,41
	2,0	9,00	3,87	4,26
	3,0	13,57	3,84	3,70
	4,0	11,66	3,73	3,25
	6,0	9,38	3,53	2,77
8	0,75	2,20	1,56	1,56
	1,0	3,09	1,91	2,14
	1,5	4,57	2,32	3,15
9	0,75	3,25	1,95	1,95
	1,0	4,28	2,16	2,37
	1,5	3,79	2,46	3,16
	3,0	4,79	2,65	2,79
	6,0	5,98	2,42	1,96
10	1,0	2,53	0,97	0,97
	1,5	1,13	1,33	1,33
	3,0	0,80	1,82	1,82
11	0,75	2,21	2,65	2,65
	1,5	3,70	3,18	3,74
	2,0	4,98	3,26	3,55
	3,0	8,64	3,19	2,98
	4,0	6,98	3,04	2,53

Próximo à fonte, nos primeiros 1000 m, 42% das simulações superestimaram as concentrações observadas. Com a interrupção do levantamento da pluma a previsão tende a piorar nas proximidades da fonte, pois a pluma fica restrita a uma região mais próxima da superfície. Os resultados restantes subestimaram as concentrações.

Para distâncias superiores a 1000 m, as simulações com interrupção do levantamento da pluma se apresentaram mais próximas das observadas, mesmo que ainda em muitos casos, essas previsões tivessem subestimado as observações.

Para demonstrar o comportamento das concentrações, o levantamento da pluma e o perfil da pluma, são explorados dois experimentos específicos, os de números 3 e 5. Estes experimentos representam alturas distintas da camada limite atmosférica, 1000 e 1500 metros, respectivamente, além de serem experimentos com maior número de pontos de concentrações observadas. Gráficos de demais experimentos instáveis podem ser visualizados no APÊNDICE 1.

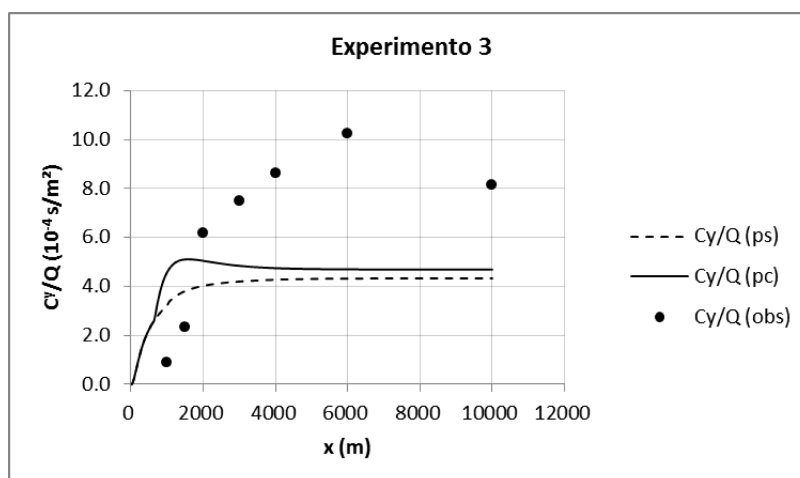
Os dados meteorológicos e de emissão referentes ao experimento 3 são:

- taxa de emissão (Q) = 4,67 g/s;
- temperatura do ar (T_a) = 13,57 ° C;
- velocidade do vento (\bar{u}) = 1,58 m/s;
- pressão atmosférica (P_a) = 990,7 mb;
- comprimento de Monin-Obukhov (L) = -14,4 m;
- velocidade de atrito (u_*) = 0,372 m/s;
- altura da camada limite (z_i) = 1000 m;
- temperatura do efluente (T_s) = 217,91 ° C;
- velocidade de emissão do efluente (w_s) = 7,66 m/s;
- parâmetro de flutuabilidade (F_b) = 173,95 (m⁴/s³).

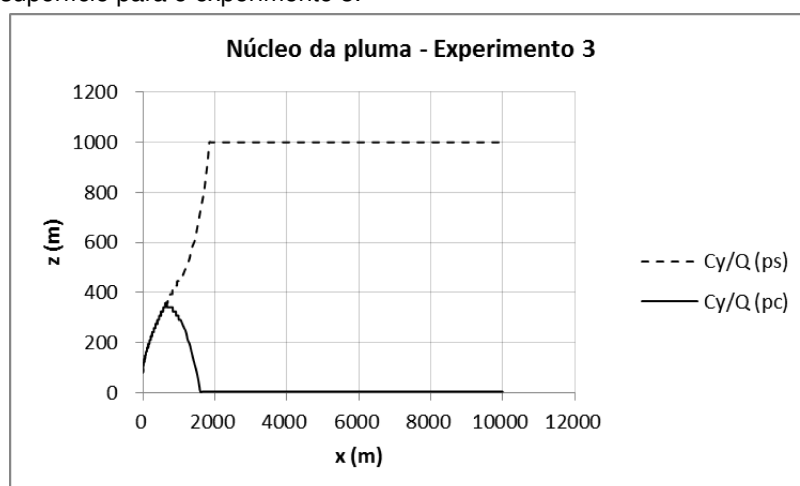
A FIGURA 10 (a) mostra as concentrações ao longo de x para o experimento 3, comparando a diferença entre as previsões com e sem interrupção do levantamento da pluma. Apesar das previsões terem sido inferiores às observações, nota-se que com a interrupção do levantamento da pluma os valores previstos são superiores, como esperado, pois a pluma tende a ficar mais próxima da superfície.

A linha central da pluma, para essa metodologia, foi considerada como a linha onde se observam as maiores concentrações. A FIGURA 10 (b) mostra a comparação para o

levantamento da pluma, referente às duas situações em questão (com e sem interrupção do levantamento).



(a) Concentrações integradas e normalizadas previstas e observadas na superfície para o experimento 3.



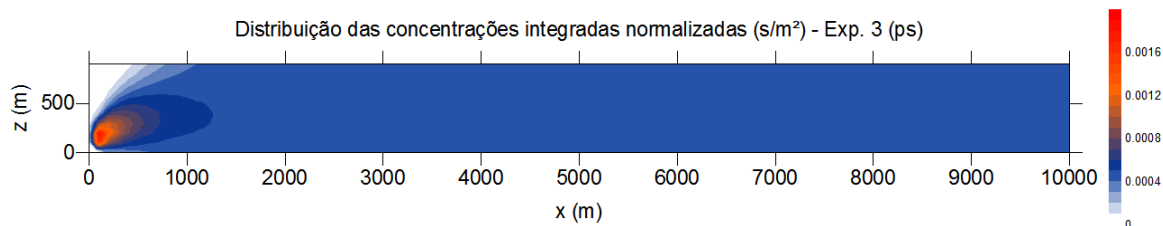
(b) Altura onde são observadas as concentrações máximas normalizadas integradas no núcleo da pluma.

FIGURA 10 – COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS E COMPARAÇÃO DO NÚCLEO DA PLUMA DE POLUENTES PARA O EXPERIMENTO 3, CASO INSTÁVEL. (pc: COM INTERRUPTÃO DO LEVANTAMENTO DA PLUMA; ps: SEM INTERRUPTÃO DO LEVANTAMENTO DA PLUMA; obs: CONCENTRAÇÃO OBSERVADA.)

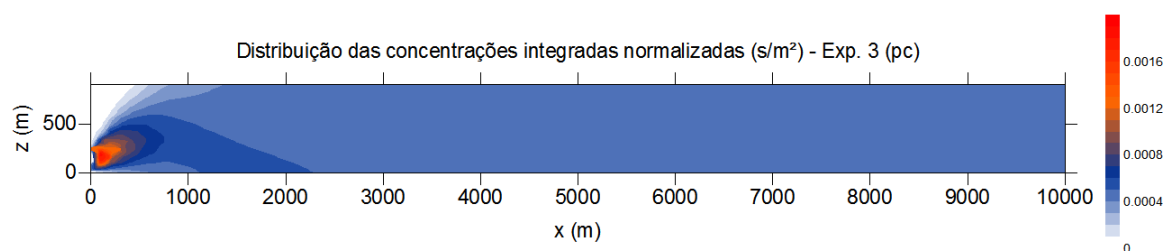
Se a pluma sobe sem que seja limitada, nota-se que ela atinge a altura da camada limite e fica restrita a esta altura. Essa situação explica o fato das concentrações previstas serem inferiores às observadas, pois a pluma está muito longe da superfície. Na segunda situação, com o bloqueio do levantamento, a pluma sobe até uma altura próxima a 400 m (inferior à altura da CLA) e as concentrações se direcionam à superfície, gerando o aumento do valor das concentrações observadas.

A seção reta vertical de distribuição das concentrações pode ser visualizada na FIGURA 11 (a) e (b). O comportamento da pluma de poluentes reforça a diferença entre considerar

a interrupção do levantamento da pluma ou não considera-la.



(a) Sem interrupção do levantamento da pluma.



(b) Com interrupção do levantamento da pluma.

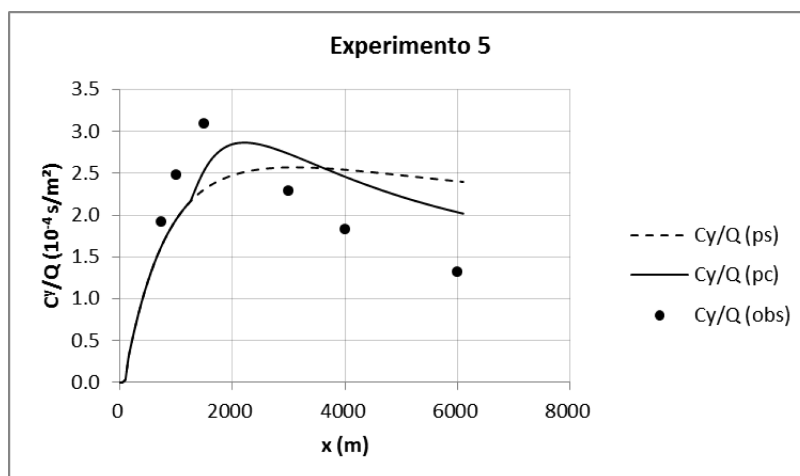
FIGURA 11 – SEÇÃO RETA VERTICAL DA DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PARA O EXPERIMENTO 3, CASO INSTÁVEL.

Quando a pluma está limitada por uma altura máxima ela é restrita a permanecer mais próxima da superfície e, conseqüentemente, as concentrações na superfície são mais altas do que se a pluma pudesse se elevar até uma altura indeterminada.

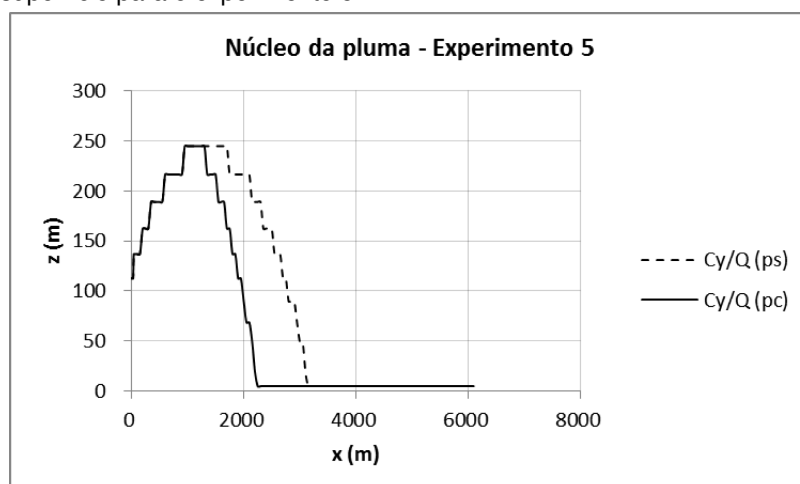
Para o experimento 5, tem-se as seguintes condições meteorológicas e de emissão:

- taxa de emissão (Q) = 4,66 g/s;
- temperatura do ar (T_a) = 26,72 ° C;
- velocidade do vento (\bar{u}) = 3,02 m/s;
- pressão atmosférica (P_a) = 996,1 mb;
- comprimento de Monin-Obukhov (L) = -66,4m;
- velocidade de atrito (u_*) = 0,6 m/s;
- altura da camada limite (z_i) = 1500 m;
- temperatura do efluente (T_s) = 221,88° C;
- velocidade de emissão do efluente (w_s) = 9,21 m/s;
- parâmetro de flutuabilidade (F_b) = 198,18 (m^4/s^3).

Para este experimento observa-se que o comportamento das concentrações previstas se aproxima do comportamento das concentrações observadas (FIGURA 12 (a)):



(a) Concentrações integradas e normalizadas previstas e observadas na superfície para o experimento 5.



(b) Altura onde são observadas as concentrações máximas normalizadas integradas no núcleo da pluma.

FIGURA 12 – COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS E COMPARAÇÃO DO NÚCLEO DA PLUMA DE POLUENTES PARA O EXPERIMENTO 5, CASO INSTÁVEL. (pc: COM INTERRUPTÃO DO LEVANTAMENTO DA PLUMA; ps: SEM INTERRUPTÃO DO LEVANTAMENTO DA PLUMA; obs: CONCENTRAÇÃO OBSERVADA).

Tanto neste experimento quanto no experimento 3, as concentrações próximas à fonte são iguais, independente da interrupção ou não do levantamento da pluma. O efeito do bloqueio da pluma só é mais significativo conforme há o afastamento da fonte.

Apesar de parecer que as duas plumas atingem a mesma altura, é importante ressaltar que esse gráfico representa a altura em que se observaram as maiores concentrações, portanto o bloqueio interfere limitando toda a pluma. Dessa forma, a partir de 1500 m, aproximadamente, a pluma sem interrupção manteve-se elevando por cerca de 200 metros de distância além da pluma que foi interrompida.

O comportamento da pluma de poluentes pode ser observado através do perfil da pluma. Reforçando a diferença entre considerar a interrupção ou não, fica bastante claro que há uma mudança significativa no comportamento entre cada situação.

As seções retas verticais de distribuição das concentrações são parecidas nos dois casos. No entanto, observa-se que há alguma diferença na altura que a pluma com bloqueio atinge, fazendo com que as concentrações sejam mais elevadas na superfície (FIGURA 13).

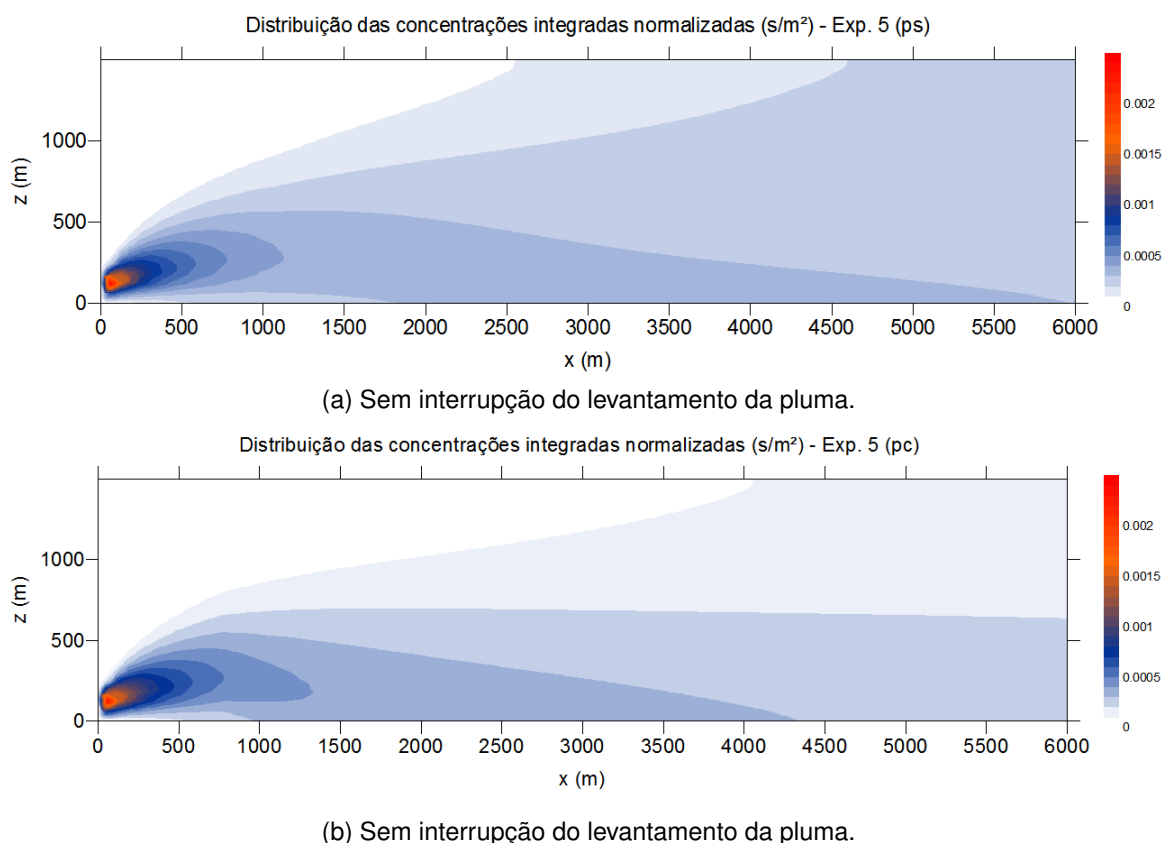


FIGURA 13 – SEÇÃO RETA VERTICAL DA DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PARA O EXPERIMENTO 5, CASO INSTÁVEL.

A FIGURA 13 ilustra como a interrupção afeta o comportamento da pluma, fazendo com que ela se incline em direção à superfície, quando sofre um bloqueio.

Na maioria das situações foi observado que o modelo se comporta igual para ambos os casos durante os primeiros 1000 metros a partir da fonte, e que a partir de 4000 m, os experimentos 7, 9 e 11 se desempenham melhor sem interrupção.

A FIGURA 14 apresenta o gráfico de dispersão de todos os resultados das concentrações previstas integradas e normalizadas pelo sistema MODELAR e as concentrações observadas integradas e normalizadas. A linha contínua do gráfico representa os valores em que concentrações previstas são iguais às concentrações observadas, ressaltando a condição de simulação perfeita. As linhas tracejadas, por sua

vez, representam o fator de 2, ou seja, valores previstos entre a metade e o dobro da concentração observada. O ideal é obter valores entre essa faixa.

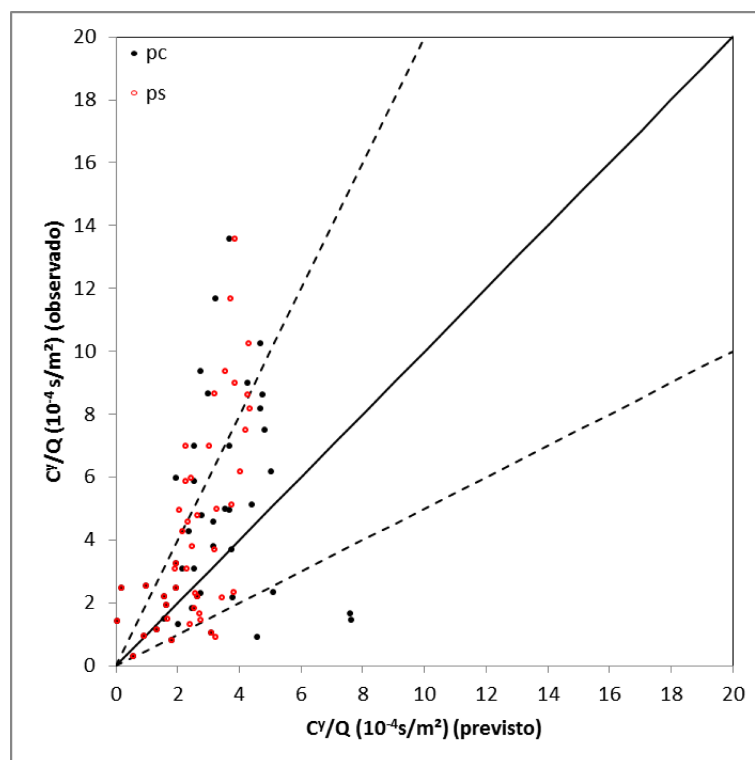


FIGURA 14 – COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES PREVISTAS INTEGRADAS E NORMALIZADAS PELO MODELAR E AS CONCENTRAÇÕES OBSERVADAS INTEGRADAS E NORMALIZADAS NO EXPERIMENTO DE INDIANÁPOLIS PARA OS CASOS INSTÁVEIS.

Para as duas situações exploradas, os dados estão distribuídos, em sua maioria (61%) dentro do limite do fator de 2. Aquelas concentrações previstas que não são aceitáveis, subestimaram as concentrações observadas, com exceção de 7 estimativas que superestimaram.

Os resultados da simulação de todos os experimentos podem ser mais bem sintetizados através das estatísticas obtidas. Pela reamostragem do *Bootstrap*, para $B = 500$, pode-se obter o valor t e comparar o desempenho entre a versão sem interrupção do levantamento da pluma com aquele em que há interrupção. A TABELA 6 apresenta os parâmetros estatísticos, a diferença entre as estatísticas ($\bar{\Delta}$), e o valor t .

TABELA 6 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA OS CASOS INSTÁVEIS.

	ps	pc	$\bar{\Delta}$	t
FB	0,50	0,35	0,152	3,157
NMSE	0,88	1,01	-0,131	-1,154
VG	2,45	2,70	-0,245	-0,987
MG	1,49	1,34	0,154	3,338
FA2	0,61	0,61	0,001	0,025
R	0,63	0,31	0,321	2,732

Os modelos são considerados com diferença estatisticamente significativa, com 90% de confiança, para os valores de $|t|$ que são maiores que 1,645. Portanto, entre estas duas versões do modelo, pode-se comparar o FB, MG e o R. Entre estes parâmetros pode-se determinar que o modelo com interrupção é melhor que o modelo sem interrupção pois atende melhor ao FB (ideal = 0) e ao MG (ideal = 1). Apesar da correlação de Pearson ter um valor melhor para o caso sem interrupção do levantamento da pluma, deve-se destacar que esse índice representa se há variação linear entre as variáveis. Por isso a necessidade da avaliação conjunta de índices estatísticos. Os índices NMSE, VG e FA2 não apresentam diferença significativa.

4.2 CASOS ESTÁVEIS

Os primeiros testes realizados utilizando a formulação de Briggs (1984) não foram satisfatórios, pois a pluma subiu indefinidamente e não foram observadas concentrações na superfície. Para corrigir este problema testou-se a abordagem com interrupção do levantamento da pluma. No entanto, ainda assim, não foi possível melhorar o desempenho das simulações.

A alternativa seguinte foi verificar o comportamento do modelo a partir da abordagem convencional de altura efetiva (h_e) pela fórmula de Carson-Moses de 1967 (EQUAÇÃO (13)), pois entre as equações específicas para estabilidade atmosférica, esta foi a única que apresentou valores consistentes para o levantamento da pluma.

Para averiguar se há diferença significativa entre utilizar o levantamento da pluma e não utilizá-lo para os casos de estabilidade atmosférica, simulações considerando somente a altura da emissão, sem somá-la ao Δh_{max} , também foram realizadas. Os resultados obtidos podem ser visualizados na TABELA 7.

TABELA 7 – CONCENTRAÇÕES OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE, INTEGRADAS E NORMALIZADAS (C_o^y/Q); CONCENTRAÇÕES PREVISTAS NA SUPERFÍCIE, INTEGRADAS E NORMALIZADAS A PARTIR DA ALTURA EFETIVA (C_{he}^y/Q) E A PARTIR DA ALTURA DA CHAMINÉ SEM LEVANTAMENTO DE PLUMA (C_{ch}^y/Q).

Exp.	$x(km)$	$C_o^y/Q(10^{-4}s/m^2)$	$C_{he}^y/Q(10^{-4}s/m^2)$	$C_{ch}^y/Q(10^{-4}s/m^2)$
1	2	3,95	0,33	16,85
	3	4,64	12,47	18,07
	10	3,32	14,06	15,21
2	1,5	2,48	6,53	14,73
	2	3,19	9,33	16,85
	3	3,50	12,47	18,07
	4	4,75	13,79	17,95
3	1	1,16	0,66	8,34
	1,5	1,20	2,70	14,51
	2	1,47	5,27	18,21
	3	1,98	9,68	21,39
4	1,5	1,45	3,14	14,78
	2	2,73	5,81	18,11
	3	3,29	10,06	20,77
5	1,5	1,38	0,04	3,61
	2	2,06	0,22	7,70
	3	2,56	1,40	15,68
	4	3,14	3,51	21,42
6	1,5	2,15	0,0005	0,83
	3	2,68	0,03	4,67
	4	3,13	0,13	7,23
7	0,75	1,06	0,35	1,42
	1	1,88	0,89	2,73
	1,5	2,69	2,30	5,08
	2	2,57	3,62	6,58
	4	1,59	6,03	8,05
8	3	3,99	4,93	11,43
	4	4,98	6,59	12,41
	6	1,23	8,20	12,37
9	1,5	2,83	2,82	6,69
	2	4,44	4,64	8,97
	4	5,36	8,36	11,58
10	1	0,29	0,21	1,43
	1,5	0,56	0,80	3,55
	3	1,10	3,64	8,42
11	2	1,14	0,08	5,23
	3	2,27	0,36	9,07
	4	2,11	0,84	11,59
	6	3,58	2,12	13,77
	8	3,18	3,39	14,28

É evidente que sem o levantamento da pluma as concentrações são superestimadas, pois a pluma é emitida na altura da chaminé e não sobe, fazendo com que permaneça próxima à superfície. No entanto, com o cálculo da altura efetiva as concentrações

previstas se aproximaram dos valores das concentrações observadas.

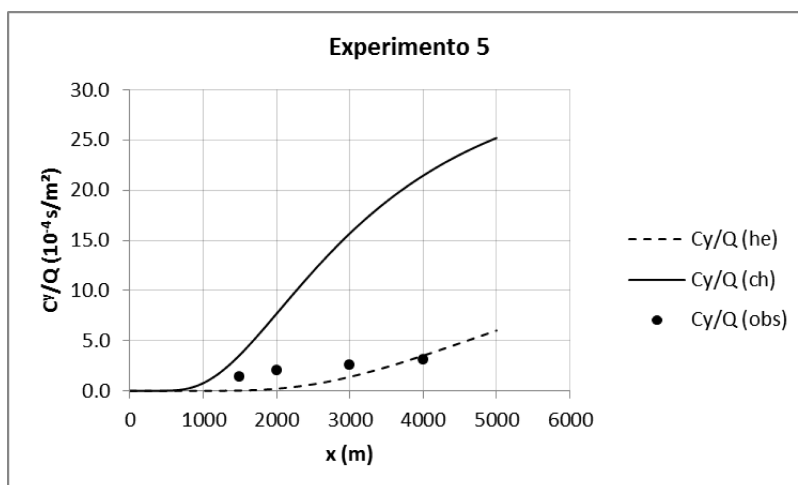
Para ilustrar o comportamento do modelo para estes experimentos, serão denotados por “ h_e ” as simulações realizadas com a altura efetiva da fonte e por “ch” os experimentos sem levantamento de pluma, nos quais a altura de emissão é a altura da chaminé.

Foram escolhidos os experimentos 5 e 11, pois representam alturas bem distintas da camada limite atmosférica (250m e 2000 m) em horários distintos. Os gráficos de demais experimentos estáveis podem ser visualizados no APÊNDICE 2.

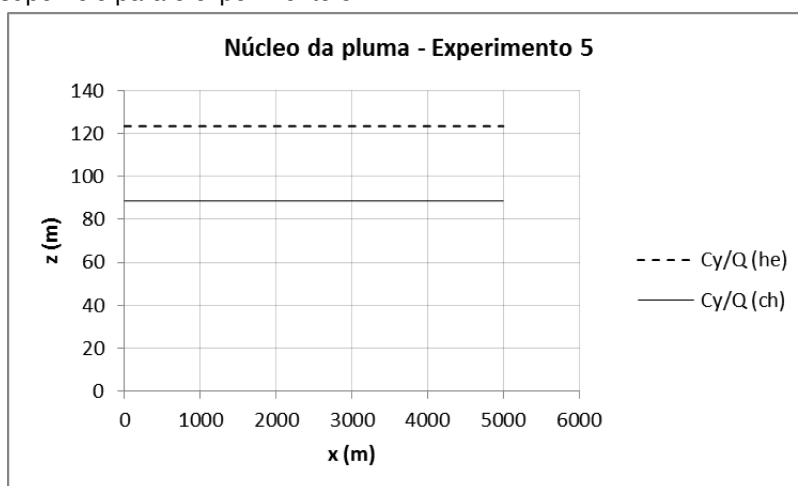
Os dados meteorológicos e de emissão para o experimento 5 são:

- taxa de emissão (Q) = 4,66 g/s;
- temperatura do ar (T_a) = 16,95 ° C;
- velocidade do vento (\bar{u}) = 1,48 m/s;
- pressão atmosférica (P_a) = 989,2 mb;
- comprimento de Monin-Obukhov (L) = 64,3m;
- velocidade de atrito (u_*) = 0,198 m/s;
- altura da camada limite (z_i) = 250 m;
- temperatura do efluente (T_s) = 216,05° C;
- velocidade de emissão do efluente (w_s) = 8,58 m/s;
- parâmetro de flutuabilidade (F_b) = 190,6 m⁴/s³.

A FIGURA 15 (a) apresenta a evolução das concentrações ao longo de x e (b) a altura onde são verificadas as concentrações máximas observadas no núcleo da pluma.



(a) Concentrações integradas e normalizadas previstas e observadas na superfície para o experimento 5



(b) Altura onde são observadas as concentrações máximas normalizadas integradas no núcleo da pluma.

FIGURA 15 – COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS E COMPARAÇÃO DO NÚCLEO DA PLUMA DE POLUENTES PARA O EXPERIMENTO 5, CASO ESTÁVEL. (h_e : ALTURA EFETIVA; ch: SEM LEVANTAMENTO DE PLUMA; obs: CONCENTRAÇÃO OBSERVADA.)

Nota-se que sem o levantamento da pluma (ch) as concentrações são mais elevadas na superfície, pois a pluma está mais próxima da mesma, enquanto que para a altura efetiva (h_e), há uma proximidade maior com os valores das concentrações observadas.

A partir da distribuição das concentrações integradas (FIGURA 16) pode-se observar o comportamento da pluma, praticamente horizontal, durante todo seu percurso ao longo de x .

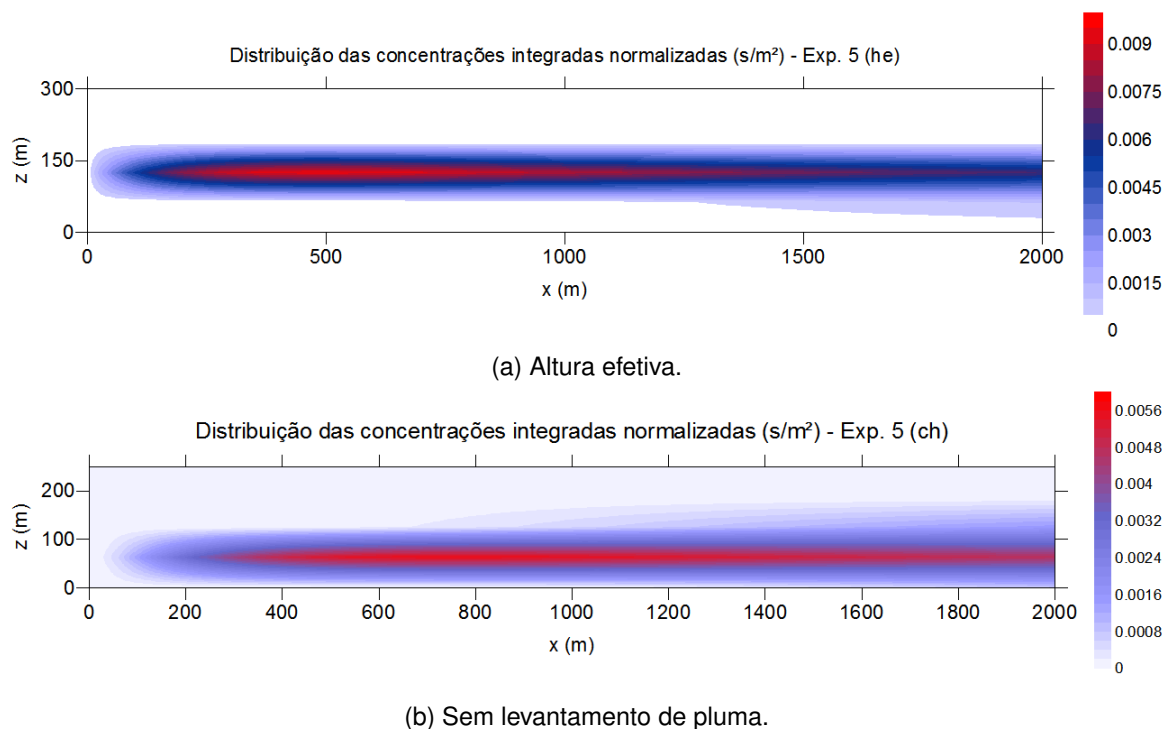


FIGURA 16 – SEÇÃO RETA VERTICAL DA DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PARA O EXPERIMENTO 5, CASO ESTÁVEL.

A diferença entre não considerar o levantamento da pluma e aplicar a altura efetiva é, primeiramente, o fato das alturas de lançamento do efluente serem distintas. Quando o poluente é lançado de um ponto superior à real emissão, o principal efeito são as concentrações serem mais baixas próximas à fonte. Sendo assim, não é possível simular os processos que ocorrem no campo próximo. No entanto, se não há consideração de levantamento da pluma, a pluma de poluentes se distribui mais próxima à superfície, gerando superestimativas durante o processo de simulação do modelo.

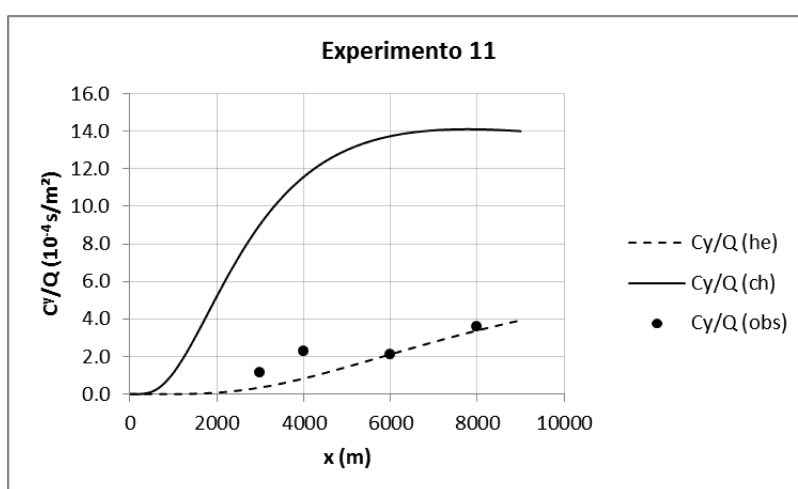
No experimento 11, a altura da camada limite é bastante elevada. No entanto, em relação ao procedimento de cálculo com altura efetiva e sem levantamento de pluma, o comportamento é bastante parecido com o experimento demonstrado anteriormente.

Os dados meteorológicos e de emissão para o experimento 11 são:

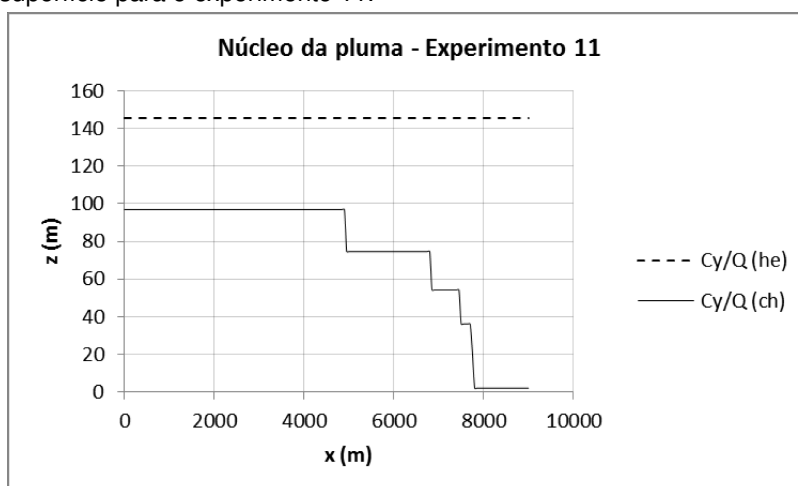
- taxa de emissão (Q) = 4,67 g/s;
- temperatura do ar (T_a) = 12,75 ° C;
- velocidade do vento (\bar{u}) = 1,98 m/s;
- pressão atmosférica (P_a) = 986, mb;
- comprimento de Monin-Obukhov (L) = 64,4m;

- velocidade de atrito (u_*) = 0,264 m/s;
- altura da camada limite (z_i) = 2000 m;
- temperatura do efluente (T_s) = 217,15° C;
- velocidade de emissão do efluente (w_s) = 8,58 m/s;
- parâmetro de flutuabilidade (F_b) = 328,19 m⁴/s³.

Na FIGURA 17 (a), é observado, novamente, que a altura efetiva é a melhor representação para simular as concentrações considerando estabilidade atmosférica.



(a) Concentrações integradas e normalizadas previstas e observadas na superfície para o experimento 11.

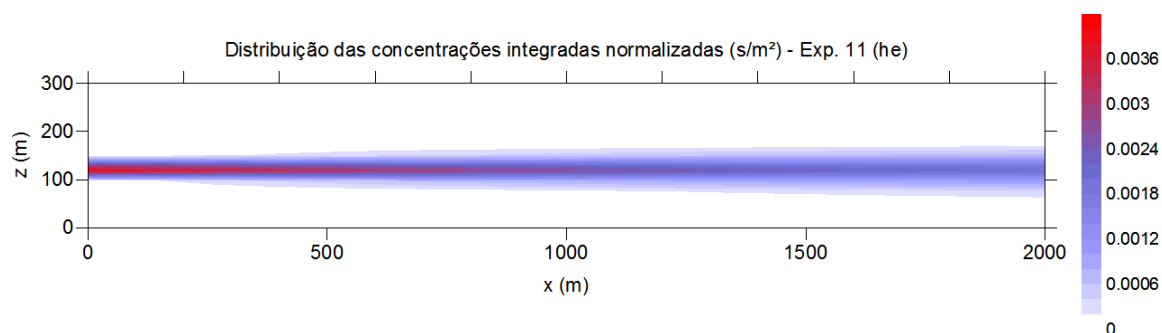


(b) Altura onde são observadas as concentrações máximas normalizadas integradas no núcleo da pluma.

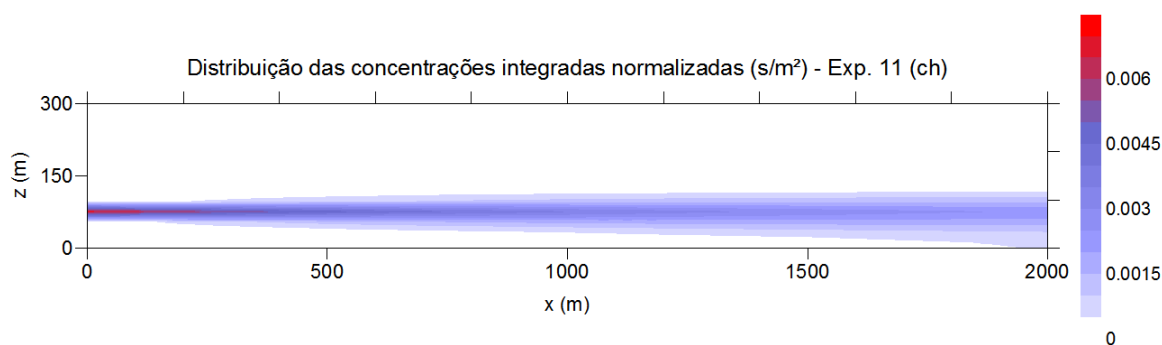
FIGURA 17 – COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS E COMPARAÇÃO DO NÚCLEO DA PLUMA DE POLUENTES PARA O EXPERIMENTO 11, CASO ESTÁVEL. (h_e : ALTURA EFETIVA; ch: SEM LEVANTAMENTO DE PLUMA; obs: CONCENTRAÇÃO OBSERVADA.)

O fato de somente considerar a altura da chaminé como altura de emissão, desprezando o levantamento da pluma (FIGURA 17 (b)) e ter a linha de concentrações máximas decaindo em direção à superfície, reforça as superestimadas concentrações previstas.

A FIGURA 18 mostra a distribuição das concentrações integradas.



(a) Altura efetiva.



(b) Sem levantamento de pluma.

FIGURA 18 – SEÇÃO RETA VERTICAL DA DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PARA O EXPERIMENTO 11, CASO ESTÁVEL.

Novamente, a altura efetiva se mostra como a melhor alternativa encontrada para representar o levantamento da pluma na condição de estabilidade da CLA. Essa comparação entre as duas situações distintas (ch e h_e) reflete a necessidade de incorporar ao modelo o termo de levantamento da pluma, para que as concentrações possam ser previstas de uma forma mais precisa e acurada.

Comparando as simulações do sistema MODELAR para os experimentos dos casos estáveis, a partir do fator de 2, é possível visualizar a quantidade de previsões que estão entre a metade e o dobro do valor das concentrações observadas (FIGURA 19).

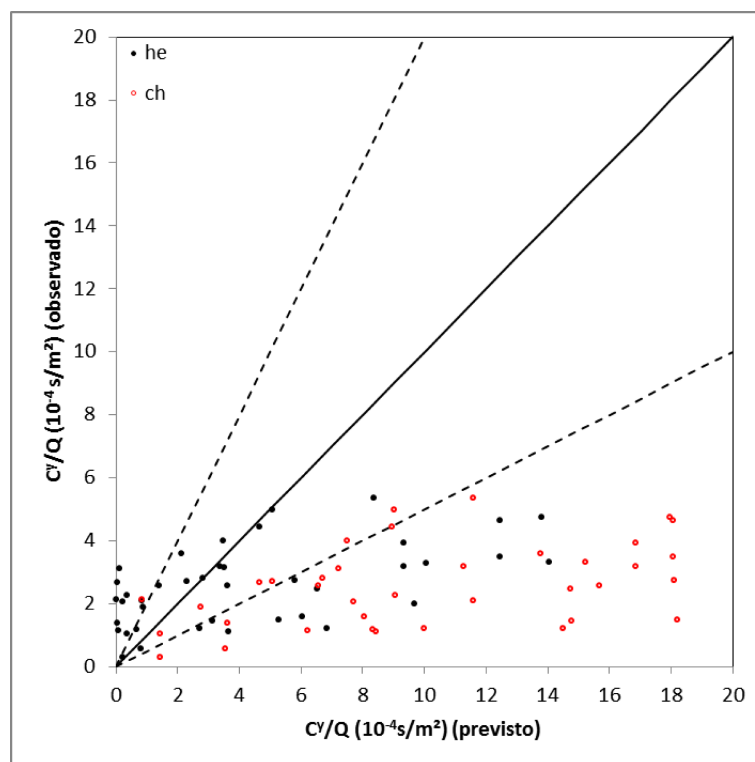


FIGURA 19 – COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES PREVISTAS INTEGRADAS E NORMALIZADAS PELO MODELAR E AS CONCENTRAÇÕES OBSERVADAS INTEGRADAS E NORMALIZADAS NO EXPERIMENTO DE INDIANÁPOLIS PARA OS CASOS ESTÁVEIS.

A maioria das previsões superestimaram as concentrações observadas. No entanto, para o cálculo a partir da altura efetiva, 35% das previsões estão entre os limites aceitáveis, enquanto apenas 15% para a situação sem o levantamento da pluma. Ainda que nenhum dos dois tenha atendido o valor ideal para um bom desempenho do modelo, neste parâmetro estatístico ($FA2 > 0,5$), a adição do levantamento da pluma permitiu melhores estimativas.

Para os casos de estabilidade observa-se que a partir do cálculo da altura efetiva da fonte obtêm-se concentrações mais próximas das observadas, em relação à omissão dos efeitos de levantamento. Esse fato pode ser confirmado através da análise estatística para comparação entre estas duas versões do modelo (TABELA 8):

TABELA 8 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA OS CASOS ESTÁVEIS.

	h_e	ch	$\bar{\Delta}$	t
FB	-0,51	-1,24	0,726	6,971
NMSE	1,44	9,17	-7,731	-4,462
VG	306,63	11,27	295,362	0,161
MG	1,39	0,25	1,139	2,531
FA2	0,35	0,15	0,197	2,175
R	0,53	0,39	0,137	1,640

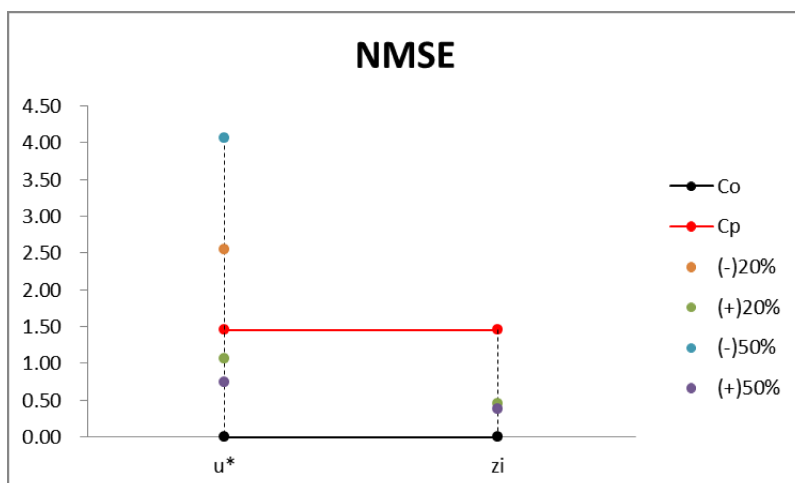
Comparando-se os parâmetros estatísticos para os quais se pretende 90% de confiança ($|t| > 1,645$), o FB (ideal = 0), o NMSE (ideal = 0), o MG (ideal = 1), e o FA2 (ideal = 1), os resultados obtidos pelo modelo com altura efetiva se mostram melhores, portanto, tornando este um possível meio para o cálculo em condições estáveis. No entanto, analisando individualmente cada parâmetro estatístico, somente o NMSE para a altura efetiva atendeu aos padrões considerados adequados para modelos de dispersão: $NMSE < 4$ (HANNA *et al.*, 2004). Todos os demais não atenderam seus limites. O VG obtido para o caso do cálculo da altura efetiva representa que as simulações obtidas possuem valores muito maiores ou muito menores em relação às concentrações observadas, fato que pode ser confirmado também pelo baixo FA2 obtido.

Através da análise de sensibilidade foram avaliados os parâmetros meteorológicos u_* e z_i , por meio dos índices estatísticos, sem reamostragem de *Bootstrap*. A TABELA 9 apresenta os valores desejáveis para cada parâmetro estatístico além dos valores obtidos para as concentrações previstas pelo sistema MODELAR:

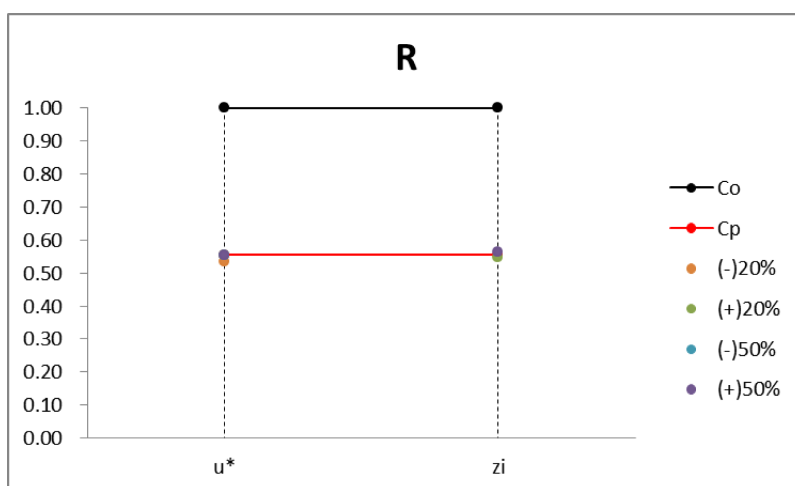
TABELA 9 – COMPARAÇÃO ESTATÍSTICA DO EXPERIMENTO DE INDIANÁPOLIS: CLA ESTÁVEL

	Desejável	MODELAR (h_e)
NMSE	0,00	1,45
R	1,00	0,55
FA2	1,00	0,34
FB	0,00	-0,52
VG	1,00	47,06
MG	1,00	1,34
Média	2,58	3,80
Desvio Padrão	1,26	3,81

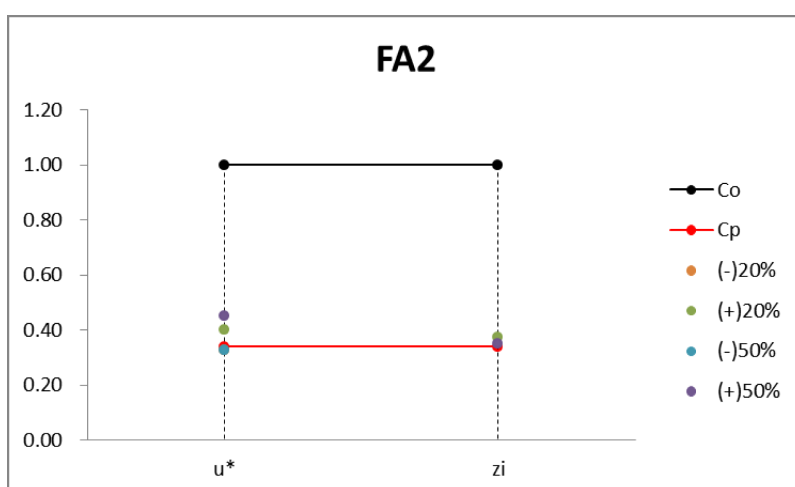
Foram elaborados gráficos para cada índice estatístico. Estes gráficos indicam como o resultado varia para cada parâmetro meteorológico (z_i e u_*). As linhas e pontos pretos indicam os valores desejáveis para a simulação, sendo a média e o desvio-padrão calculados para os dados observados, e os demais índices apresentam os valores ideais. As linhas e pontos vermelhos indicam os parâmetros estatísticos relativos às concentrações previstas. Os pontos em amarelo e verde representam, respectivamente, a variação de menos e mais 20% do valor do parâmetro avaliado, e os pontos em azul e roxo representam a variação de menos ou mais 50%, respectivamente.



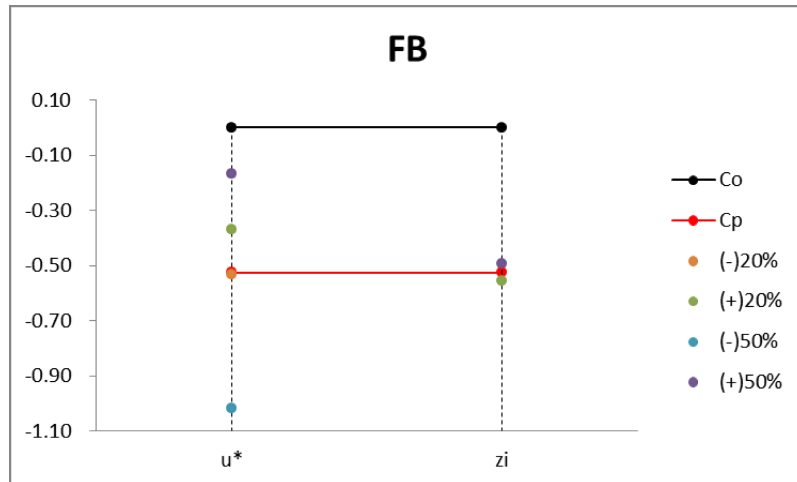
(a) Erro médio quadrático normalizado (NMSE).



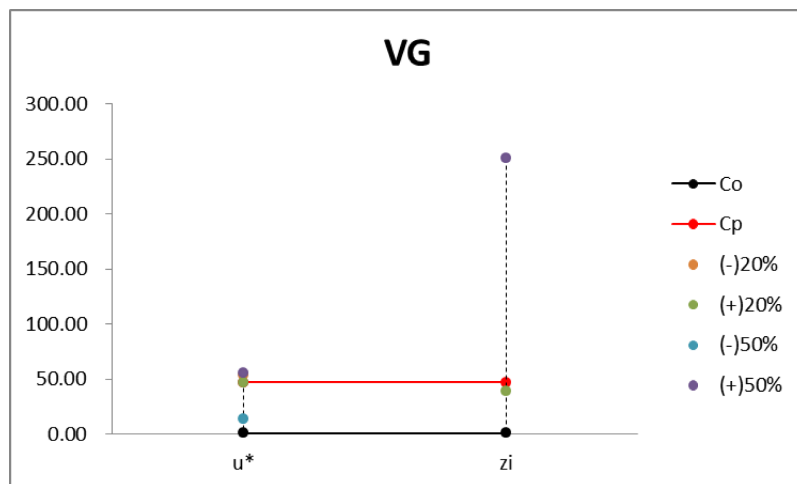
(b) Correlação de Pearson (R).



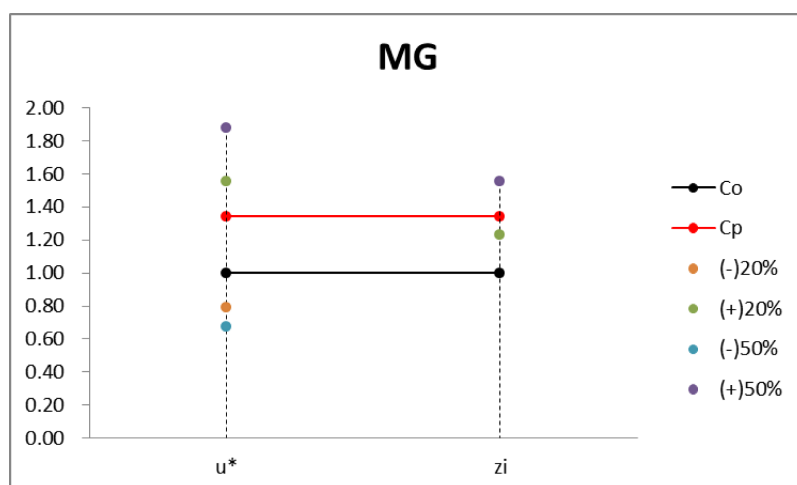
(c) Fator de 2 (FA2).



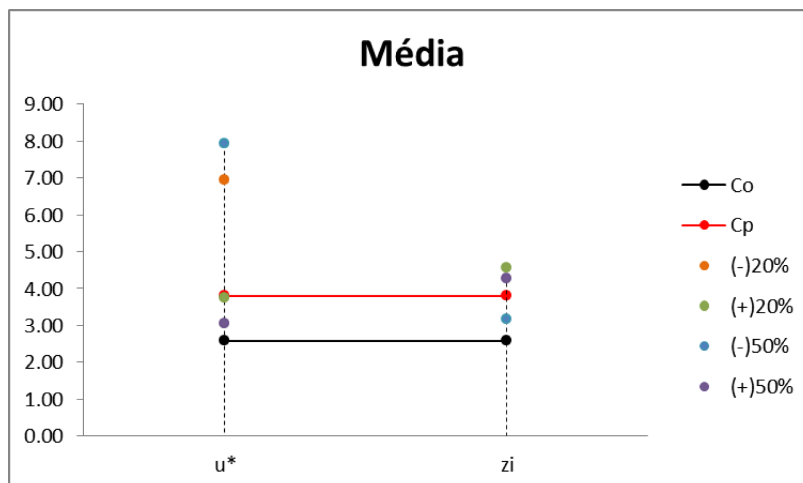
(d) Desvio fracional (FB).



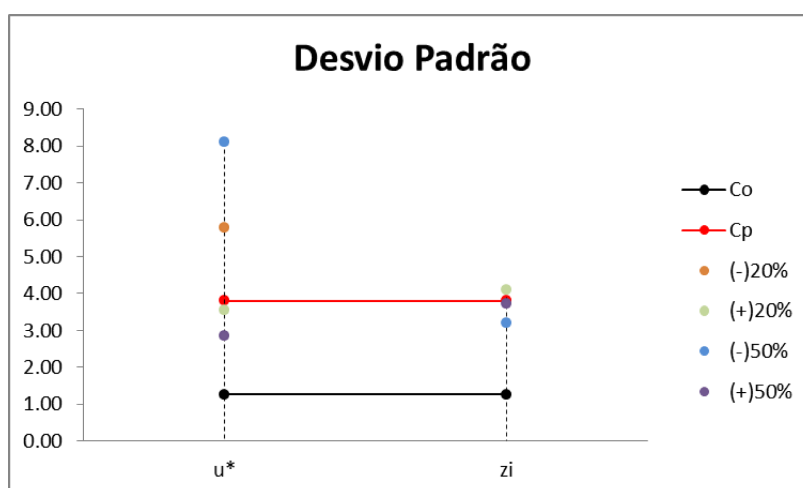
(e) Variância geométrica (VG).



(f) Desvio médio geométrico (MG).



(g) Média.



(h) Desvio padrão.

FIGURA 20 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELAR ÀS VARIAÇÕES DOS PARÂMETROS u_* E z_i PARA CLA ESTÁVEL Co : VALORES IDEAIS PARA OS PARÂMETROS ESTATÍSTICOS (CONCENTRAÇÕES OBSERVADAS INTEGRADAS E NORMALIZADAS); Cp : VALORES PREVISTOS SEM VARIAÇÃO DE PARÂMETROS (CONCENTRAÇÕES PREVISTAS INTEGRADAS E NORMALIZADAS).

Em todos os gráficos pode-se observar que o fator que mais influencia nas previsões é a velocidade de atrito, modificando consideravelmente todos os índices estatísticos. Apesar da variação da altura da camada limite interferir nas previsões, os índices mais afetados por ela são o NMSE e o VG, enquanto que nos demais, a variação foi pequena em torno dos dados previstos.

Esta análise permite considerar que, mesmo que não haja precisão nos dados da altura da camada limite, esse não é o fator que está determinando os erros de previsão no modelo. No entanto, a velocidade de atrito deve ser mais precisa possível, porque mesmo pequenas variações podem causar diferenças grandes, como no caso da média,

em que uma variação de -20% em u_* tornou a média quase três vezes maior em relação à desejável, e quase duas vezes maior do que a prevista sem variação do parâmetro.

4.3 DISCUSSÃO

A partir dos resultados apresentados nas seções anteriores, pode-se comparar o MODELAR a outros modelos de dispersão.

A TABELA 10 mostra estatísticas de três modelos de dispersão confrontadas aos resultados obtidos pelo MODELAR: o desvio geométrico (MG), a variância geométrica (VG) e o fator de 2 (FA2). O desempenho do MODELAR se refere à combinação das simulações para os casos de instabilidade atmosférica com levantamento de pluma com interrupção do levantamento e as simulações para os casos de estabilidade com cálculo da altura efetiva de emissão. O modelo ISC3 (*Industrial Source Complex Model Version 3*), assim como o AERMOD, é recomendado pela US-EPA, enquanto o modelo ADMS (*Advanced Dispersion Modeling System*) foi desenvolvido no Reino Unido. Ambos são modelos gaussianos. Mais detalhes sobre o desempenho dos modelos citados podem ser encontrados em Hanna *et al.* (2001).

TABELA 10 – COMPARAÇÃO ENTRE PREVISÕES DE DIFERENTES MODELOS DE DISPERSÃO PARA O EXPERIMENTO DE INDIANÁPOLIS.

Modelo	MG	VG	FA2
<i>AERMOD</i>	1,54	13	0,39
<i>ISC3</i>	0,85	6,80	0,49
<i>ADMS</i>	1,14	5,60	0,42
<i>MODELAR</i>	1,33	9,87	0,49
<i>IDEAL</i>	1,00	1,00	1,00
<i>ACEITAVEL</i>	0,7 < MG < 1,3	VG < 1,6	FA2 > 0,5

Somente o modelo ISC3 apresenta um dos parâmetros dentro do limite aceitável (VG = 0,85). No entanto, todos os outros modelos, para o experimento de Indianápolis obtiveram desempenho semelhante ao sistema MODELAR. Entre eles destaca-se ainda um desempenho favorável ao MODELAR para o fator de 2, superior ao do AERMOD (FA2 = 0,39) e ao do ADMS (FA2 = 0,42), além de ser igual ao do ISC3 (FA2 = 0,49). Para os índices MG e VG, o MODELAR foi também melhor em relação ao AERMOD, estando seus valores mais próximos do ideal.

Após extensa pesquisa, foram encontrados os valores observados para a altura da pluma nos estudos de Indianápolis (HANNA e CHANG, 1991). No entanto, não são todos os experimentos que possuem observações da altura da pluma. As alturas observadas da pluma foram obtidas pelo sistema *DIAL*. Esse sistema é um *LIDAR* calibrado para produzir seções transversais de concentrações de SO₂ através da pluma (FIGURA 21) (TRC, 1986).

As seções transversais da pluma, na direção do vento, são geralmente obtidas a uma distância de 0,5 km da fonte. Desta forma, foi determinada a altura considerada máxima de elevação da pluma.

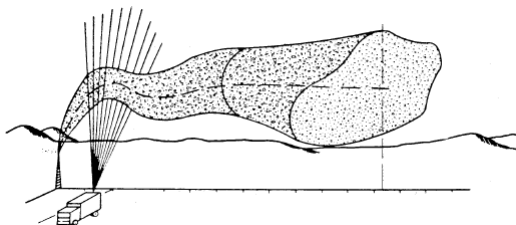


FIGURA 21 – SISTEMA *DIAL*. FONTE: TRC (1986).

Uma comparação entre os valores observados e simulados é apresentado na TABELA 11 e TABELA 12 para os casos de instabilidade e estabilidade atmosférica. Nos casos de instabilidade atmosférica, considerou-se para comparação a altura calculada máxima que a pluma pode atingir (com interrupção do levantamento da pluma), e nos casos de estabilidade atmosférica foi considerada a altura utilizada para o cálculo da altura efetiva.

TABELA 11 – COMPARAÇÃO ENTRE Δh_{max} (metros) OBSERVADO E PREVISTO PARA OS CASOS INSTÁVEIS.

Exp.	Δh_{max} Observado	Δh_{max} Previsto	$(\Delta h_o - \Delta h_p)$
1	66	581,6	- 515,6
2	296	558,2	-262,2
3	516	348,7	167,3
4	66	264,7	-198,7
5	236	230,6	5,4
6	Não observado	318,2	–
7	156	232,7	-76,7
8	156	229,9	-73,9
9	156	290,8	-134,8
10	96	299,9	-203,9
11	166	242,7	-76,7

TABELA 12 – COMPARAÇÃO ENTRE Δh_{max} (metros) OBSERVADO E PREVISTO PARA OS CASOS ESTÁVEIS.

Exp.	Δh_{max} Observado	Δh_{max} Previsto	$(\Delta h_o - \Delta h_p)$
1	66	18,9	47,1
2	66	25	41
3	Não observado	18,8	–
4	Não observado	18,8	–
5	46	43,3	2,7
6	116	19,6	96,4
7	166	42,7	123,3
8	36	26,1	9,9
9	56	30,2	25,8
10	186	27,7	158,3
11	476	34,1	441,9

Comparando as alturas observadas e as alturas máximas simuladas há, de fato, certa divergência nos cálculos. Enquanto os casos instáveis superestimaram a altura da pluma, pode-se constatar que nos casos estáveis, a altura máxima da pluma subestimou os valores observados.

A diferença obtida entre as alturas observadas e as alturas simuladas pode ser analisada, por exemplo, pelo fator de 2. O fator de 2 para os casos instáveis é de 0,7 representando que 70% das simulações estão entre o dobro e a metade dos valores observados e previstos. Para os casos estáveis o fator de 2 representa 33% se comparado aos valores observados (FIGURA 22).

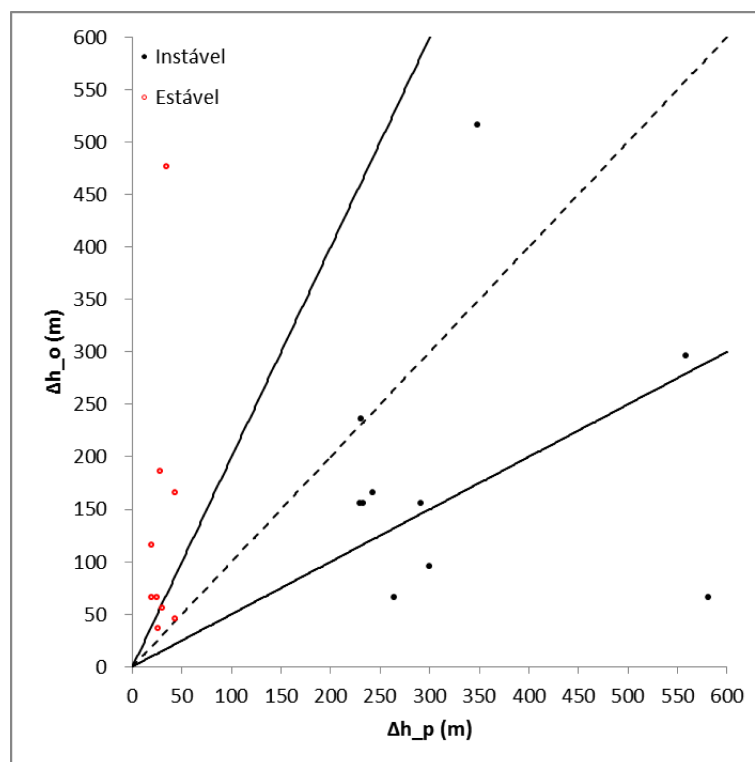


FIGURA 22 – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE Δh_{max} PREVISTOS PELO MODELAR E AS ALTURAS OBSERVADAS NO EXPERIMENTO DE INDIANÁPOLIS.

Estes resultados demonstram um melhor comportamento das previsões para os casos instáveis do que para os estáveis, como já concluído anteriormente.

Para os casos estáveis, foram simulados experimentos utilizando a altura observada da pluma no cálculo da altura efetiva e foi verificado o comportamento do modelo. Os resultados de concentrações obtidos foram até 1000 vezes menores do que os valores observados. Por exemplo, no experimento 5, no qual a altura efetiva teve apenas 2,7 metros de diferença em relação ao calculado, nota-se uma diferença significativa entre as observações e as simulações das concentrações (TABELA 13):

TABELA 13 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS CALCULADAS PARA Δh_{max} PREVISTO E Δh_{max} SIMULADO: EXP. 5 ESTÁVEL.

$x(km)$	$C_o^y/Q(s/m^2)$	$C_{he}^y/Q(previsto)(s/m^2)$	$C_{he}^y/Q(observado)(s/m^2)$
1,5	1,38	0,04	0,0014
2	2,06	0,22	0,0149
3	2,56	1,40	0,2017
4	3,14	3,51	0,7973

Portanto, para a correção das previsões do sistema MODELAR nos casos estáveis não são somente as formulações de elevação da pluma que estão afetando os resultados obtidos, pois aplicando a altura da pluma observada no modelo, a observação e a simulação ainda obtiveram grande divergência de resultados. Isto pode ser um indício

de que algo que poderia melhorar o problema é a mudança das parametrizações de turbulência, por exemplo.

Porém, para os casos instáveis, a situação em que a altura da pluma teve uma diferença de apenas 5,4 metros, o experimento pode reproduzir mais satisfatoriamente as concentrações observadas (TABELA 5, experimento 5). Outro exemplo pode ser visualizado no experimento 9, em que simulou-se através do MODELAR a altura máxima da pluma delimitada através da altura observada (156 metros), que anteriormente era de 290,8 metros (TABELA 14).

TABELA 14 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS CALCULADAS PARA Δh_{max} OBSERVADO E Δh_{max} PREVISTO: EXP. 9 INSTÁVEL.

$x(km)$	$C_o^y/Q(s/m^2)$	$C_{pc}^y/Q(simulado)(s/m^2)$	$C_{pc}^y/Q(observado)(s/m^2)$
0,75	3,25	1,95	4,10
1	4,28	2,37	4,40
1,5	3,79	3,16	4,14
3,0	4,79	2,79	3,01
6,0	5,98	1,96	2,03

Foram obtidos melhores resultados quando utilizada a altura observada para a limitação do levantamento da pluma. Portanto, conclui-se que o problema não está nas formulações da trajetória da pluma, mas na equação que delimita a altura máxima da pluma, pois quando a altura máxima é delimitada a partir das observações, os resultados se aproximam das observações. Neste caso, uma nova formulação para delimitar a altura máxima da pluma seria conveniente, pois mesmo que as estatísticas dos casos instáveis estejam dentro ou próximo do desejável, outras parametrizações podem ser avaliadas.

6 CONCLUSÃO

Uma das principais aplicações da modelagem de dispersão de poluentes atmosféricos é a previsão de concentrações ao nível da superfície, como abordado nesta pesquisa. Para isto é necessário simular os processos atmosféricos. O sistema MODELAR, apesar de apresentar resultados competitivos já na sua primeira versão (ARMANI *et al.*, 2014), tem carência de alguns módulos que poderiam aprimorar seus resultados. Um deles é o levantamento da pluma de poluentes emitida por uma fonte estacionária contínua.

O objetivo principal deste trabalho é implementar um módulo de levantamento de pluma no sistema MODELAR. Uma abordagem diferente da convencional aplicação de altura efetiva é tratada. Aplica-se o Δh local de forma a simular o levantamento da pluma verticalmente a cada passo da solução numérica, utilizando para isso, as equações de Briggs (1984), pois apesar das diversas formulações para levantamento de pluma, a sua maioria consiste em formulações empíricas, e não se observa consistência entre os valores obtidos para o experimento em questão. Esse fato vem consolidar a ideia de que ainda não há uma metodologia bem estabelecida para a solução efetiva deste problema. Buscou-se, então, contribuir no sentido de aplicar a formulação mais implementada (CIMORELLI *et al.*, 2004; EPA, 2005) em um modelo de dispersão de poluentes. A metodologia utilizada permite que possa ser descrito o levantamento da pluma desde a sua emissão, permitindo a análise das concentrações em um campo próximo à fonte. No caso da aplicação da altura efetiva, não é possível essa visualização, pois a fonte é considerada muito mais elevada do que fisicamente é, tornando as previsões nas proximidades da fonte subestimadas.

Para implementar o levantamento da pluma separaram-se os experimentos de Indianápolis (HANNA *et al.*, 2005) de acordo com a estabilidade atmosférica, através do comprimento de Monin-Obukhov: casos instáveis ($L < 0$) e casos estáveis ($L > 0$). Para os casos instáveis foram analisadas outras duas situações, sendo a primeira aplicando somente a formulação de Briggs (1984) e a segunda delimitando iterativamente a altura máxima que a pluma poderia atingir (Briggs, 1975). Já nos casos estáveis, a metodologia pretendida não teve bom desempenho, pois a pluma subia indefinidamente, e não foi possível simular concentrações ao nível da superfície. Para contornar este problema, comparou-se o desempenho do modelo para os experimentos sem o levantamento da pluma e utilizando o cálculo da altura efetiva.

Conjuntamente ao desenvolvimento da metodologia para levantamento de pluma, foi desenvolvido um módulo para cálculo de estatísticas, através da metodologia designada pelo ASTM (2010) e do método de *Bootstrap* (HANNA, 1988; HANNA, 1989) que permite comparação entre o desempenho de modelos, ou mesmo entre versões diferentes de um mesmo modelo. Desta forma pode-se comparar, estatisticamente, qual seria a melhor forma de simular o levantamento da pluma.

Aplicando a metodologia, foi constatado que para os experimentos com instabilidade na camada limite atmosférica o modelo obteve uma resposta razoável. Através da análise de índices estatísticos constatou-se que com 90% de confiança, o modelo com a interrupção do levantamento da pluma é superior ao sem levantamento de pluma para os índices estatísticos FB (desvio fracional), MG (desvio médio geométrico) e R (correlação de Pearson). Apenas os índices fator de 2 (FA2) e erro quadrático médio normalizado (NMSE) estão dentro dos limites para considerar o modelo com bom desempenho (HANNA *et al.*, 2004).

Apesar dos casos de camada limite estável não serem reproduzidos através da mesma metodologia aplicada aos instáveis, a adaptação do modelo à abordagem mais tradicional de levantamento de pluma reproduz concentrações mais próximas das observadas, em relação ao modelo sem levantamento da pluma. Através da análise estatística fica claro que a metodologia da altura efetiva ainda não pode ser considerada satisfatória, e nem se pode afirmar que seja a mais adequada. Outras abordagens devem ser estudadas. No entanto, a proximidade entre as previsões e as observações aumentou consideravelmente.

Para verificar se nos casos de estabilidade os parâmetros meteorológicos tinham alguma influência sobre os possíveis erros das previsões, analisou-se a sensibilidade do modelo em relação à velocidade de atrito (u_*) e à altura da camada limite atmosférica (z_i). Os demais parâmetros não foram analisados por não influenciarem significativamente nas simulações, como já verificado em estudos anteriores (CONTE, 2013). O principal questionamento era a influência da altura da camada limite, pois para casos de estabilidade, o experimento apresentava alturas bastante elevadas da CLA, chegando a 2000 metros, que poderia ser um dado duvidoso para tais condições atmosféricas. No entanto, pela análise de sensibilidade, verificou-se que este parâmetro não interferiu de forma significativa nas previsões do modelo. Na maioria dos índices estatísticos, mesmo variando a altura da CLA entre 20 e 50%, os índices novos ficaram bastante próximos do que seria sem a variação. As únicas exceções foram para o NMSE e para o VG. Uma hipótese para a solução deste problema seria testar outras parametrizações de turbulência e vento, pois este pode ser o fator que não tem permitido uma simulação tão adequada para atmosfera estável.

Após estas análises, pode-se determinar que a melhor combinação de metodologias para o cálculo do levantamento da pluma é utilizar a formulação de Briggs (1984) com interrupção do levantamento da pluma (BRIGGS, 1975) para os casos instáveis, enquanto que para os casos estáveis optou-se por manter o cálculo da altura efetiva e inseri-lo como um parâmetro de entrada do modelo. Essa combinação de métodos possibilitou a comparação do sistema MODELAR com outros modelos, como o AERMOD (CIMORELLI *et al.*, 2004), o ISC3 (HANNA *et al.*, 2001) e o ADMS (HANNA *et al.*, 2001). O sistema MODELAR apresentou bom desempenho pois obteve índices estatísticos melhores ou

iguais a estes modelos.

No entanto, a partir da análise das alturas máximas da pluma através de observações (HANNA e CHANG, 1991) são verificadas algumas inconsistências nas alturas simuladas da pluma. Nos casos instáveis, seria conveniente uma nova avaliação aplicando uma formulação diferente para a altura máxima que a pluma atinge, pois os valores simulados demonstraram que há uma superestimativa em relação às observações. Já para os casos estáveis, seria necessário, além de novas formulações para o levantamento da pluma, testar também outras parametrizações de turbulência, pois mesmo utilizando a altura observada para novas simulações, o modelo não está sendo capaz de reproduzir o comportamento da pluma.

Portanto, ainda não foi possível obter a metodologia que permitisse que o modelo atingisse índices estatísticos dentro dos limites desejáveis, verificados por Hanna *et al.* (2004). Porém, o sistema MODELAR teve um avanço em seu desenvolvimento, podendo simular o levantamento da pluma, além de possuir um novo módulo para o cálculo de estatísticas a serem comparadas a outros modelos.

A caracterização e descrição matemática do transporte difusivo e advectivo de poluentes envolve um número de parametrizações e simplificações bastante grande, podendo estes serem os responsáveis pela dificuldade em simular processos como o levantamento da pluma. Descrever o levantamento da pluma não é trivial, pois está relacionado a fatores físicos, como o diâmetro da chaminé; a parâmetros meteorológicos, como a estabilidade atmosférica; e, com características do poluente que está sendo emitido, como a densidade, temperatura e velocidade de emissão. No entanto, apesar das dificuldades em descrever tais processos, através desta primeira tentativa em implementar o levantamento de pluma no sistema MODELAR foi possível reproduzir os experimentos de Indianápolis, com acurácia competitiva com aquela de outros modelos consagrados internacionalmente. Porém, ainda é necessário aprimorar tais resultados, seja através de diferentes parametrizações de levantamento de pluma ou de testes com outras parametrizações de turbulência, além de realizar novas simulações a partir de dados de outros experimentos disponíveis na literatura.

REFERÊNCIAS

ALESSANDRINI, S.; FERRERO, E.; ANFOSSI, D. A new lagrangian method for modelling the buoyant plume rise. **Atmospheric Environment**, v. 77, p. 239-249, 2013.

ALMEIDA, R. C. de, DIAS N. L. da C., CUNHA, C. da N., *et al.* Sistema MODELAR. **Relatório de Pesquisa n° 39**. In: Projeto SISTEMA MODELAR - Modelo Regulatório de Qualidade do Ar para o estado do Paraná, 2011.

AMS, **American Meteorological Society**. Glossary of Meteorology. 2012. Disponível em: <http://glossary.ametsoc.org> Acesso em: jan. de 2014.

ARBAGE, M. C. A.; DEGRAZIA, G. A.; MORAES, O. L. L. **Simulação euleriana da dispersão da pluma de poluente atmosférico de Candiota-RS**. Departamento de Física da Universidade Federal de Santa Maria, RS. Revista Brasileira de Meteorologia, v.21, n.2, p. 153-160, 2006.

ARMANI, F. A. S. **Avaliação dos modelos de dispersão atmosférica Modelar e Aermod em comparação com os dados do experimento de campo do projeto *Prairie Grass***. Monografia do curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, 2011.

ARMANI, F. A. S.; ALMEIDA, R. C.; DIAS, N. L. C. Statistical evaluation of a new air dispersion model against AERMOD using the *Prairie Grass* data set. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 64(2), p. 219-226, 2014.

ARYA, S. P. **Air Pollution meteorology and dispersion**. Oxford University Press, New York, 1999.

ARYA, S. P.; LAPE Jr, J. F. A comparative study of the different criteria for the physical modeling of buoyant plume rise in a neutral atmosphere. **Atmospheric Environment**, v. 24A, p. 289-295, 1990.

ASTM Standard D6589 **Standard guide for statistical evaluation of atmospheric dispersion model performance**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

BARAD, M. L. E. Project *Prairie Grass*, A Field Program In Diffusion. **Geophysical Research Paper**, n° 59, v. I. Relatório Técnico Report AFCRC-TR-58-235(I), Air Force Cambridge Research Center, 1958.

BEYCHOK, M. R. **Plume Rise**. Fundamentals of stack gas dispersion, Newport Beach, California, USA, 4th Ed., p. 59-82, 2005.

BRIGGS, G. A. A plume rise model compared with observations. **Journal of the Air Pollution Control Association**, v. 15, p. 433-438, 1965.

BRIGGS, G. A. Plume rise. **USAEC Critical Review Series**, TID-25075, NTIS, 1969.

BRIGGS, G. A. **Some recent analyses of plume rise observations**. Proceedings of the Second International Clean Air Congress. Englund, H. M. and Berry, W. T., Academic Press, p. 1029-1032, 1971.

BRIGGS, G. A. Plume rise predictions. Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analysis. Haugen, D. A., **American Meteorological Society**, p. 59-111, 1975.

BRIGGS, G. A. Plume rise and buoyancy effects. **Atmospheric Science and Power Production**. Randerson, D., Editor, U.S. Dept. de Energia. p. 327-366, 1984.

CARSON, J. E.; MOSES, H. The validity of several plume rise formulas. **Journal of the Air Pollution Control Association**, Argonne National Laboratory, v. 19, p. 852-866, 1969.

CIMORELLI, A. J.; PERRY, S. G.; VENKATRAM, A.; WEIL, J. C.; PAINE, R. J.; WILSON, R. B.; LEE, R. F.; PETERS, W. D.; BRODE, R. W.; PAUMIER, J. O. AERMOD: Description of model formulation. **Relatório técnico**, U.S. Environmental Protection Agency, 2004.

CONCAWE Working Group. Empirical equation for plume rise. **Atmospheric Environment**, v. 2, p. 227, 1968.

CONTE, G. G., **Avaliação do modelo numérico de dispersão de poluentes atmosféricos MODELAR para diferentes condições de estabilidade da Camada Limite Atmosférica**. Monografia do curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, 2013.

COX, W.; TIKVART, J. A Statistical Procedure for Determining the Best Performing Air Quality Simulation Model. **Atmospheric Environment**, v. 24A, p.2387-2395, 1990.

DAM, Datasets for Atmospheric Modelling. **Indianapolis Tracer Data and Meteorological Data**. Disponível em: <http://rem.jrc.ec.europa.eu/dam> Acesso em: ago. de 2013.

DEGRAZIA, G. A.; GOEDERT, J., OLIVEIRA, A. P., MORAES, O. L. L. **Parâmetros de dispersão em camada limite convectiva**. Congresso Brasileiro de Meteorologia, Edição VII, p. 460-464, 1992.

DEGRAZIA, G. A.; RIZZA, U.; MANGIA, C.; TIRABASSI, T. Validation of a new turbulent parameterisation for dispersion models in a convective boundary layer. **Boundary Layer Meteorology**, v. 85, p. 243-254, 1997.

DEGRAZIA, G. A.; ANFOSSI, D.; CARVALHO, M., TIRABASSI, T.; VELHO, H. C. Turbulence parameterization for PBL dispersion models in all stability conditions. **Atmospheric Environment**, v. 34, p. 3575-3583, 2000.

EPA - Environmental Protection Agency. **Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions**. Federal Register, Rules and Regulations. v. 70, U.S, 2005.

FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para dinâmica dos fluidos**. EDUSP, 2000.

GRYNING, S. E.; LYCK, E. **The Copenhagen tracer experiments: Reporting of Measurements**. Riso-R-1054. Riso National Laboratory, Roskilde, 2002.

GRYNING, S.; HOLTSLAG, A. A. M.; IRWIN, J.; SIVERTSEN, B. Applied dispersion modeling based on meteorological scaling parameters. **Atmospheric Environment**, v. 21, p. 79-89, 1987.

HANNA, S. R. Air quality model evaluation and uncertainty. **JAPCA**, v. 38, p. 406-412, 1988.

HANNA, S. R. Confidence limits for air quality model evaluations, as estimated by bootstrap and jackknife resampling methods. **Atmospheric Environment**, v. 23, p. 1385-1398, 1989.

HANNA, S. R.; STRIMAITIS, D. G.; CHANG, J. C. **Hazard response modeling uncertainty (a Quantitative Method)**. Vol. I: User's Guide for Software Evaluating Hazardous Gas Dispersion Models. Sigma Research Corporation, Westford, MA, 1991.

HANNA, S. R.; CHANG, J. C. **Modification of the Hybrid Plume Dispersion Model**

(HPDM) for Urban Conditions and Its Evaluation using the Indianapolis Data Set. Appendices A and B to Volume II: Model Evaluation Results. EPRI Project n° RP-02736-1, EUA, 2001.

HANNA, S. R.; EGAN, B. A.; PURDUM, J.; WAGLER, J. Evaluation of the ADMS, AERMOD and ISC3 dispersion models with the OPTEX, DUKE, FORECAST, KINCAID, INDIANAPOLIS, and LOVETT FIELD data sets. **Int. J. Environment and Pollution**, vol. 16, p. 301-314, 2001.

HANNA, S. R.; HANSEN, O. R.; DHARMAVARAM, S. FLACS CFD air quality performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass, and EMU observations. **Atmospheric Environmental**, v. 38, p. 4675-4687, 2004.

HANNA, S. R.; CHANG, J. C., OLESEN, H. R. **Indianapolis Tracer Data and Meteorological Data.** EPRI, USA, 2005.

HOULT, D. P.; FAY, J. A.; FORNEY, L. J. A theory of plume rise compared with field observations. **Journal of the Air Pollution Control Association**, v. 19, p. 585-590, 1969.

HOUYOUX, M.R. **Technical Report: Plume Rise Algorithm Summary for the Sparse Matrix Operator Modeling System (SMOKE).** MCNC, North Carolina Supercomputing Center, 1998.

KISTLER, R.; KALNAY, E.; COLLINS, W.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; KANAMITSU, M.; KOUSKY, V.; van den DOOL, H.; JENNE, R.; FIORINO, M. The NCEP-NCAR 50° Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, p. 247-267, 2001.

LUCAS, D. H.; MOORE, D. J.; SPURR, G. The Rise of hot plumes from chimneys. **Int. J. Air Wat. Poll.**, v. 7, p. 473-500, 1963.

MACEY, H. H. Technical Note: Bosanquet's plume rise formula and the T.V.A data. **Atmospheric Environment**, v. 4, p. 577-583, 1970.

MOREIRA, D. M.; TIRABASSI, T. Modelo matemático de dispersão de poluentes na atmosfera: um instrumento técnico para a gestão ambiental. **Ambiente e Sociedade**, Campinas, v. VII, p. 159-171, 2004.

MOSES, H.; CARSON, J. E. Stack design parameters influencing plume rise. **Journal of the Air Pollution Control Association**, v. 18, p. 454-457, 1968.

OLESEN, H. R. **User's Guide to the Model Validation Kit**. 2005. Disponível em: <http://www.harmo.org/kit> . Acesso em: jan. 2014.

PANOFSKY, H. A.; DUTTON, J. A. **Atmospheric Turbulence**. John Wiley & Sons, New York, 1988.

PASQUILL, F.; SMITH, F. B. **Atmospheric Diffusion**. Ellis Horwood Ltd. Chichester, England, 1983.

PERRY, S. G.; BURNS, D. J.; ADAMS, R. J.; PAINE, R. J.; DENNIS, M. G.; MILLS, M. T.; STRIMAITIS, D. G.; YAMARTINO, R. J.; INSLEY, E. M. **User's guide to the Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations (CTDMPLUS) Volume 1: Model Description and User Instructions**. U. S. Environmental Protection Agency, 1989.

SEINFELD, J. H. **Air pollution: physical and chemical fundamentals**. Universidade de Michigan, McGraw-Hill, 1975.

SLAWSON, P. R.; CSANADY, G. T. On the mean path of buoyant, bent-over chimney plumes. **J. Fluid Mech.**, v. 28, p. 311-322, 1967.

STULL, R. **Meteorology for Scientists and Engineers**. The University of British Columbia, Brooks/Cole, p. 379-398, 2000.

TRC Environmental Consultants **Urban Power Plant Plume Studies**. EPRI Report EA-5468, EPRI, 3412 Hillview Ave, Palo Alto, Ca 94304, 1986.

T. V. A.; TENNESSE VALLEY AUTHORITY **Full-scale study of plume rise at large electric generating stations**. Division of Health and Safety, Muscle Shoals, Alabama, 1968.

WEIL, J. C. **Plume Rise**. Lectures on Air Pollution Modeling, Boston, ch. 3, p. 119-166, 1988.

WORTMANN, S.; VILHENA, M.; MOREIRA, D.; BUSKE, D. A new analytical approach to

simulate the pollutant dispersion in the PBL. Relatório técnico, **Atmospheric Environment**, v. 40, p. 2171-2178, 2004.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – GRÁFICOS DOS EXPERIMENTOS INSTÁVEIS	79
APÊNDICE 2 – GRÁFICOS DOS EXPERIMENTOS ESTÁVEIS	90

APÊNDICE 1 – GRÁFICOS DOS EXPERIMENTOS INSTÁVEIS

EXPERIMENTO 1

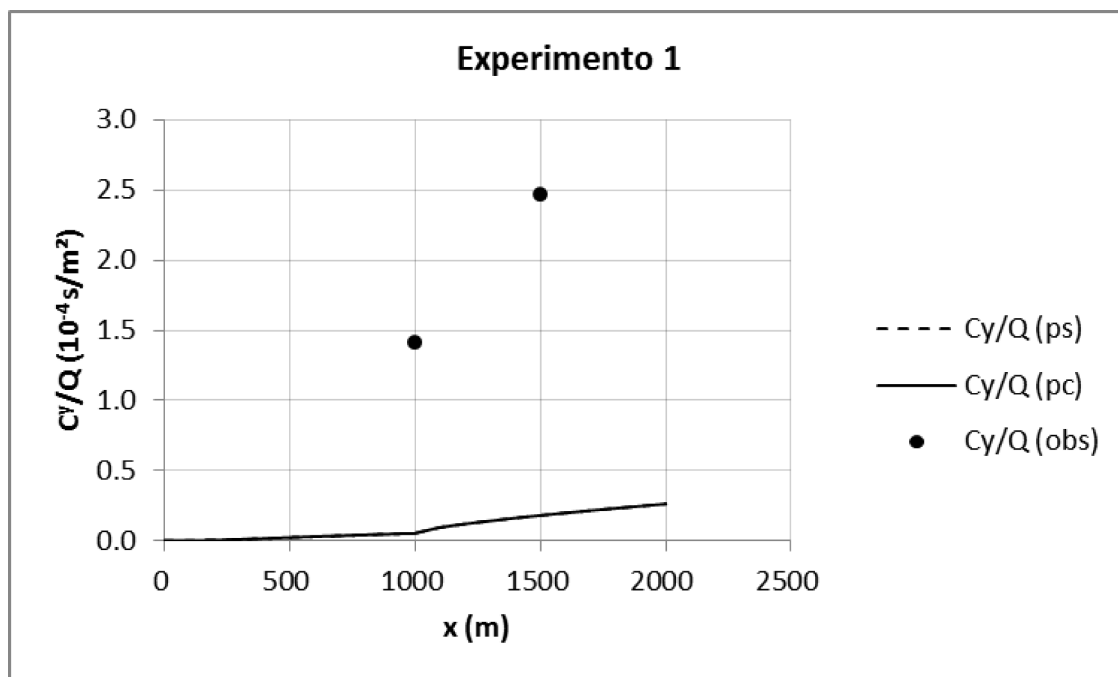


FIGURA A.1 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

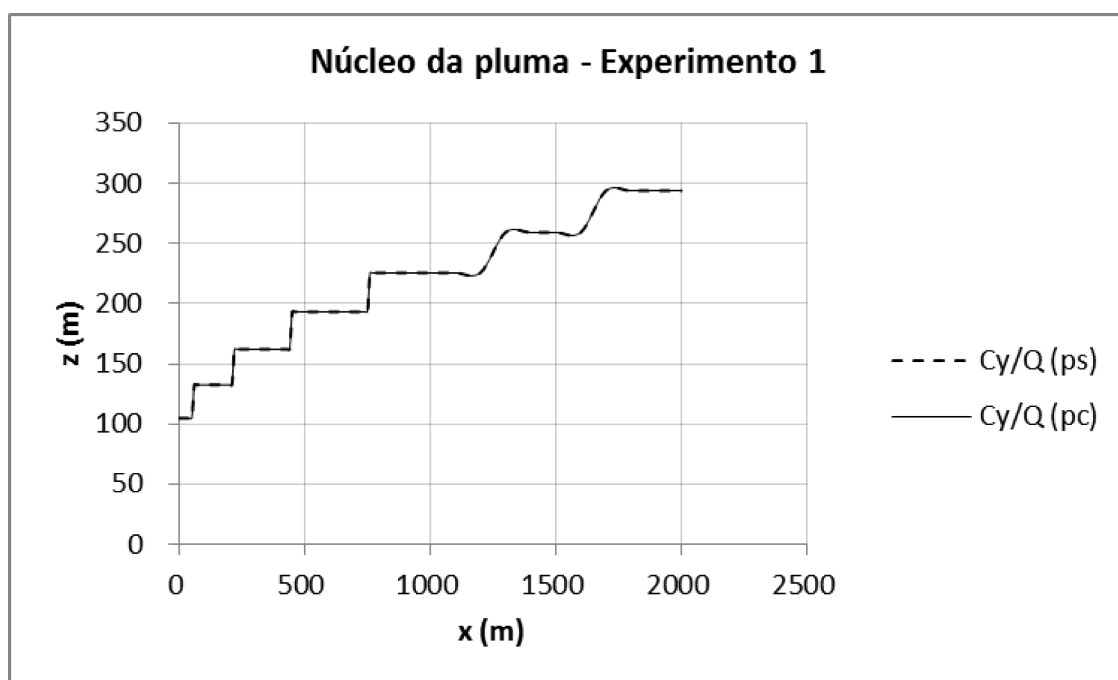


FIGURA A.2 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 2

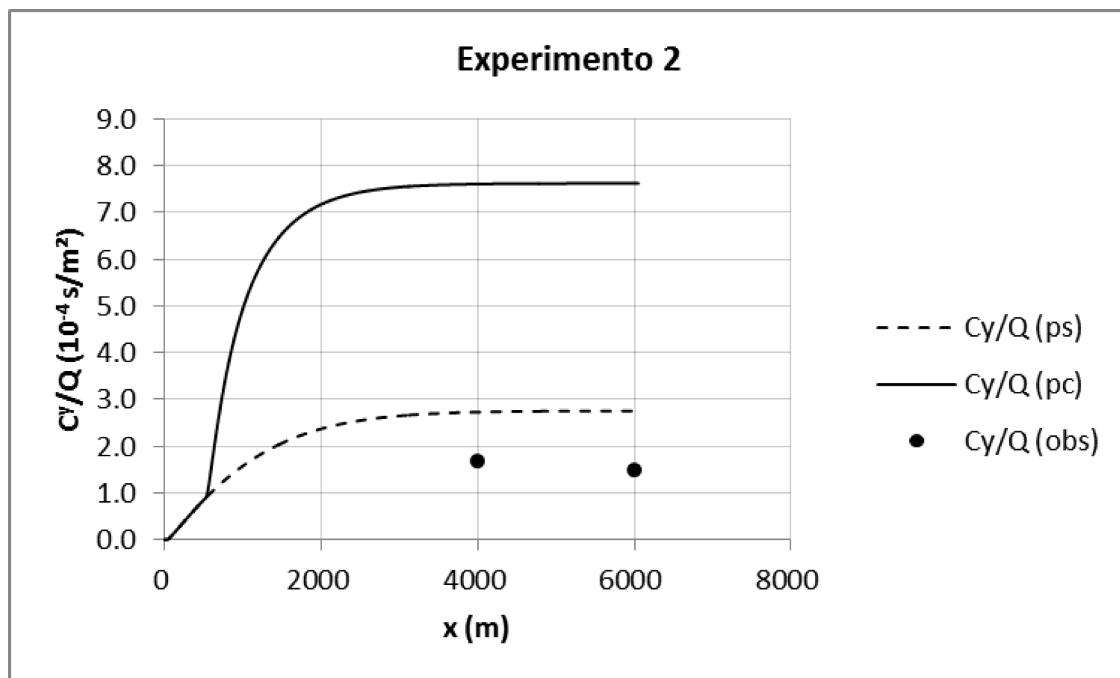


FIGURA A.3 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

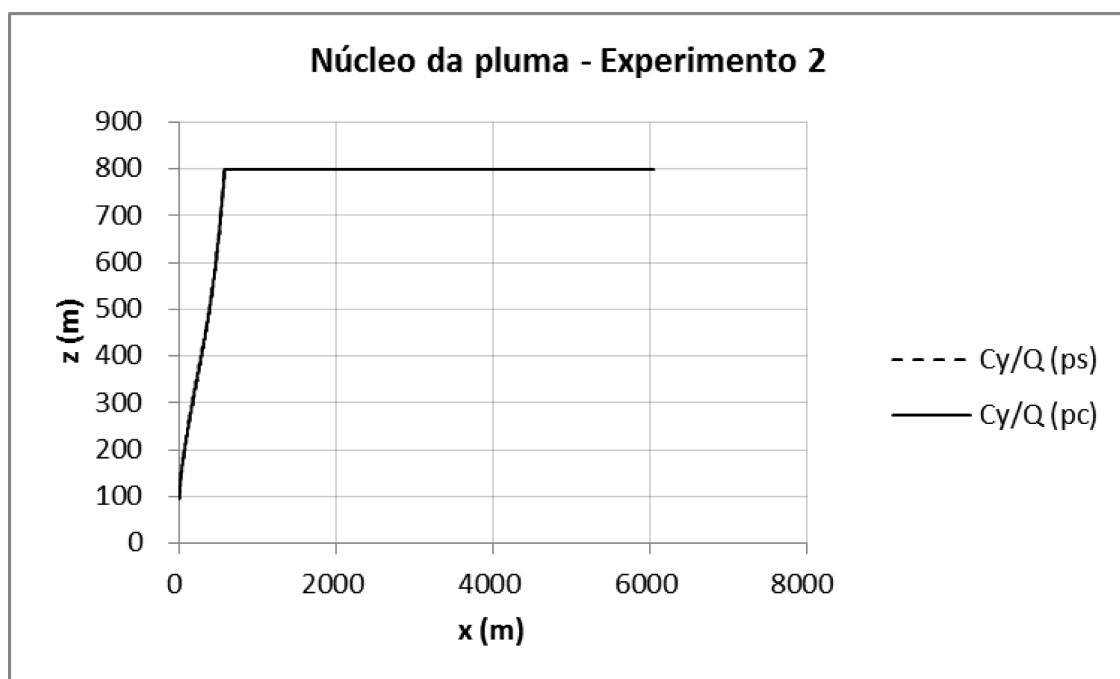


FIGURA A.4 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 3

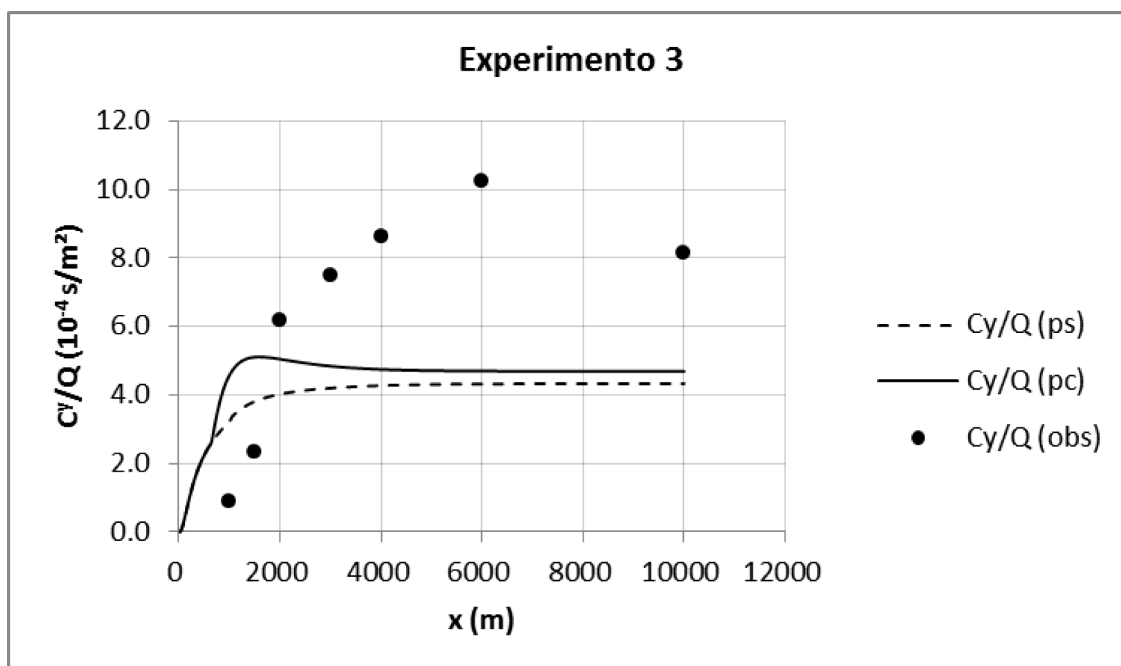


FIGURA A.5 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

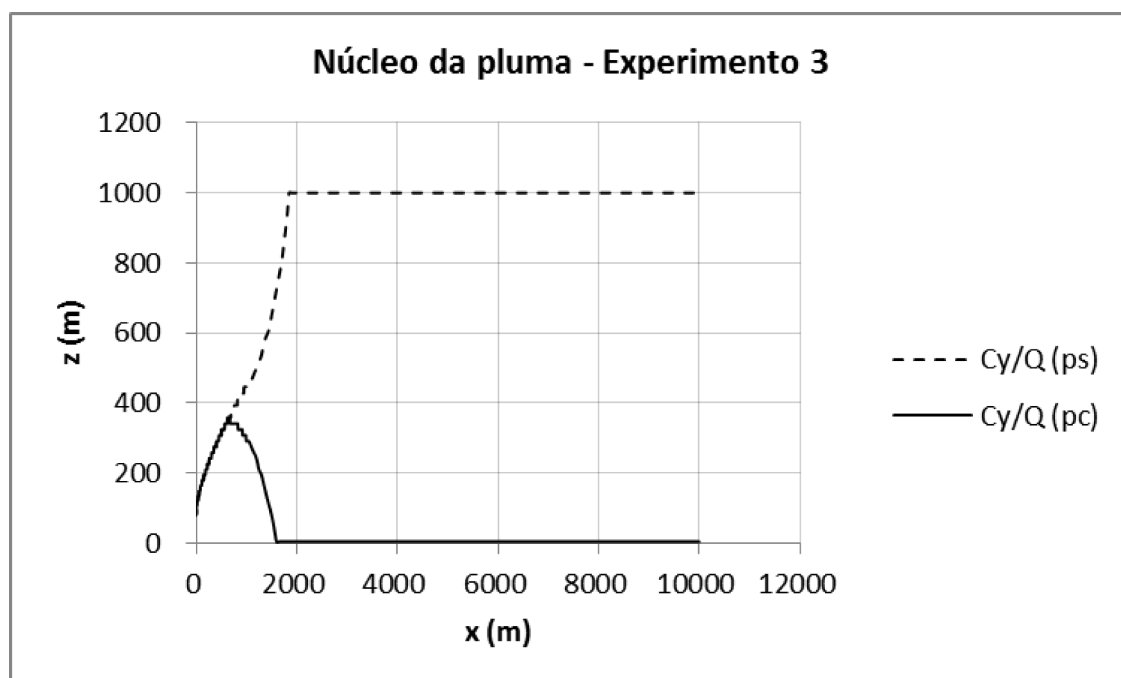


FIGURA A.6 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 4

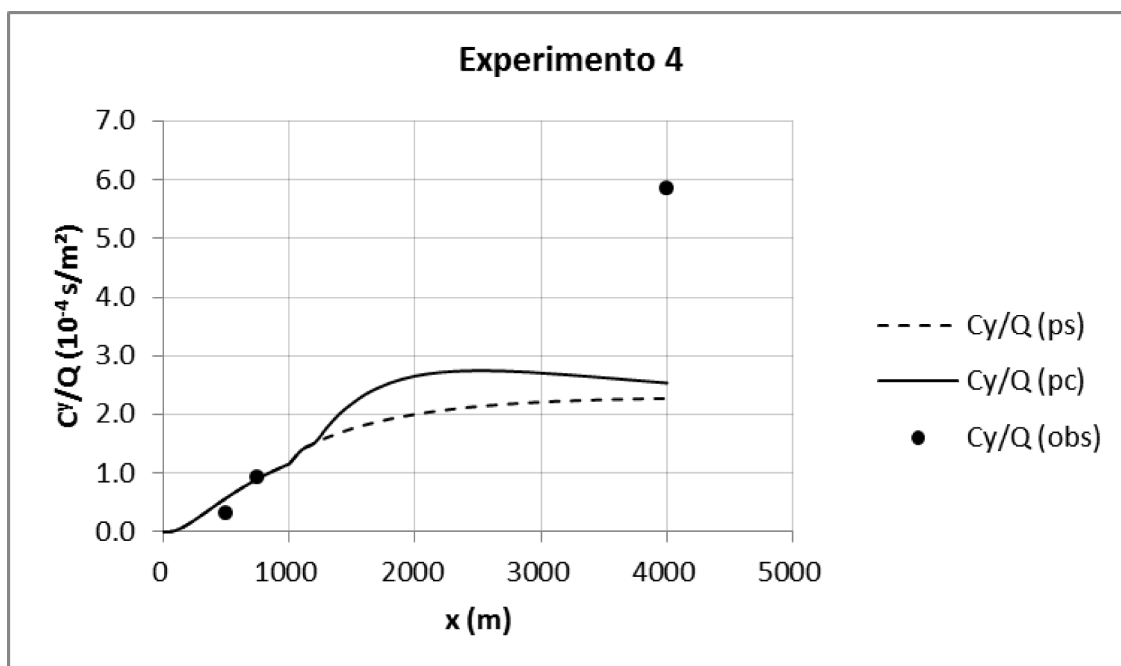


FIGURA A.7 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

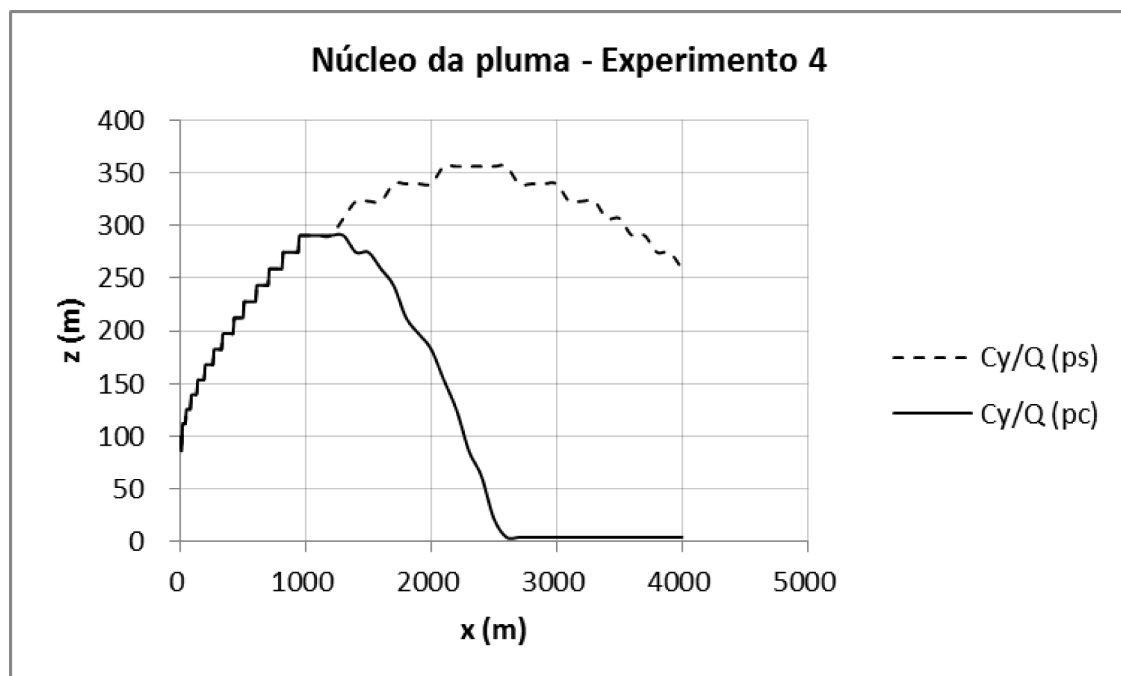


FIGURA A.8 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 5

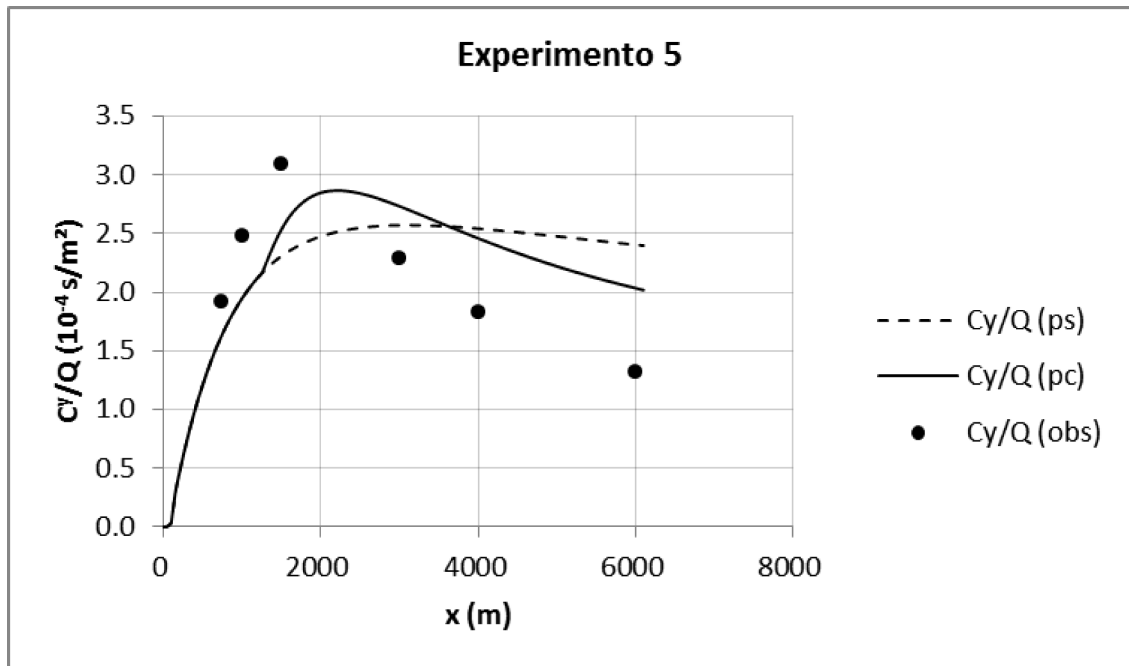


FIGURA A.9 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

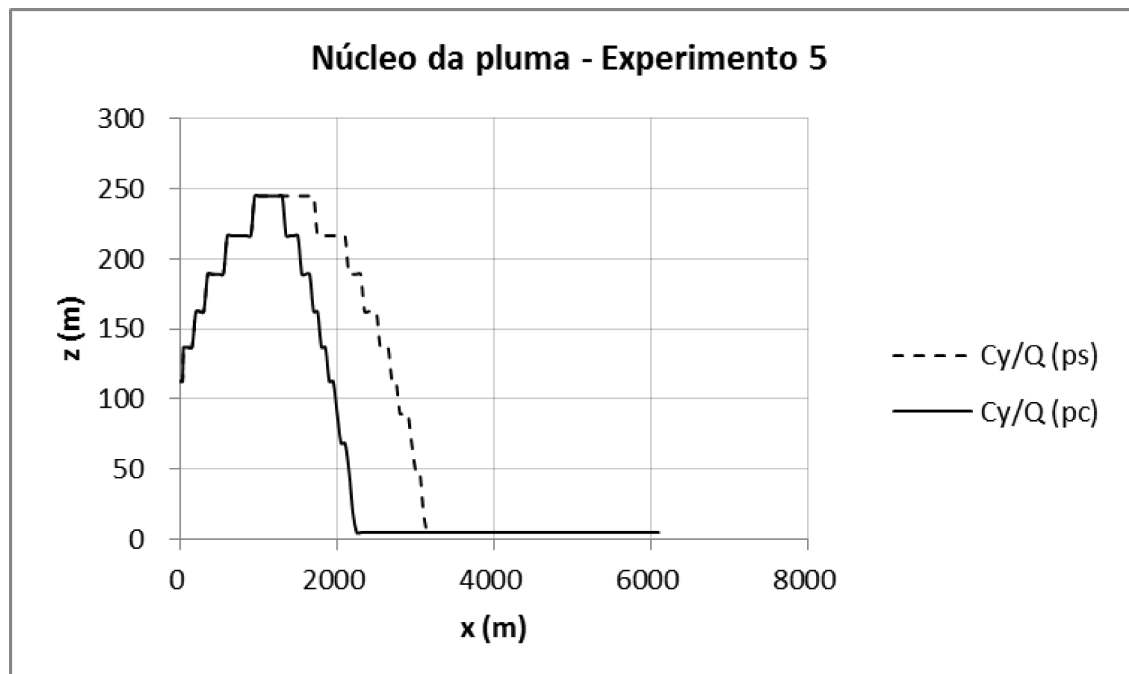


FIGURA A.10 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 6

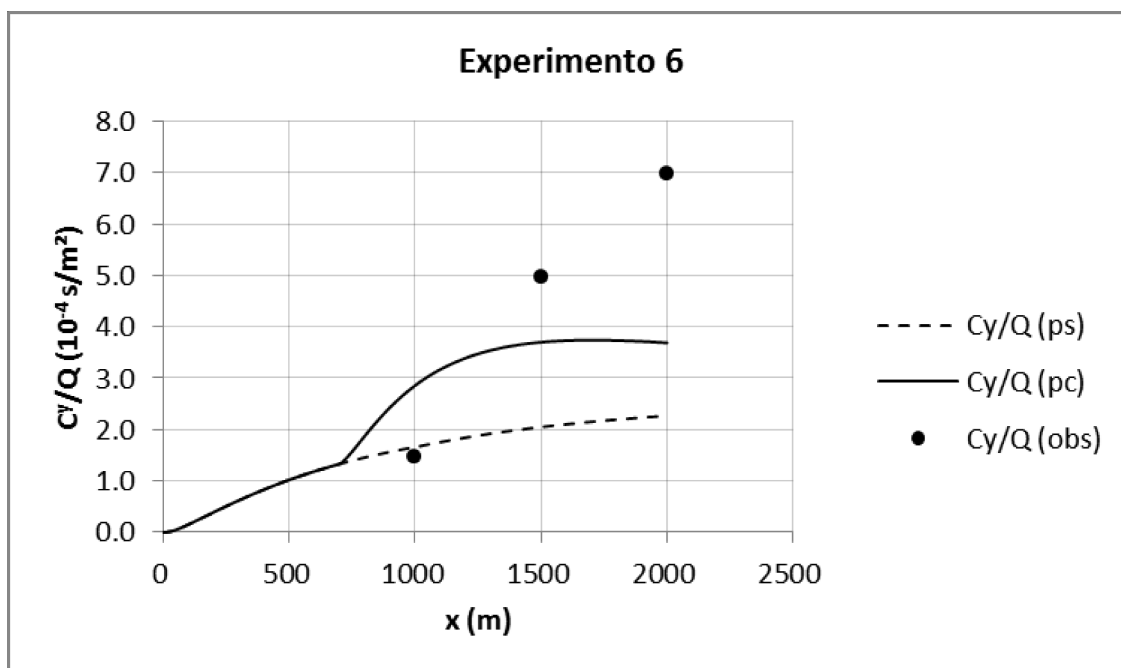


FIGURA A.11 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

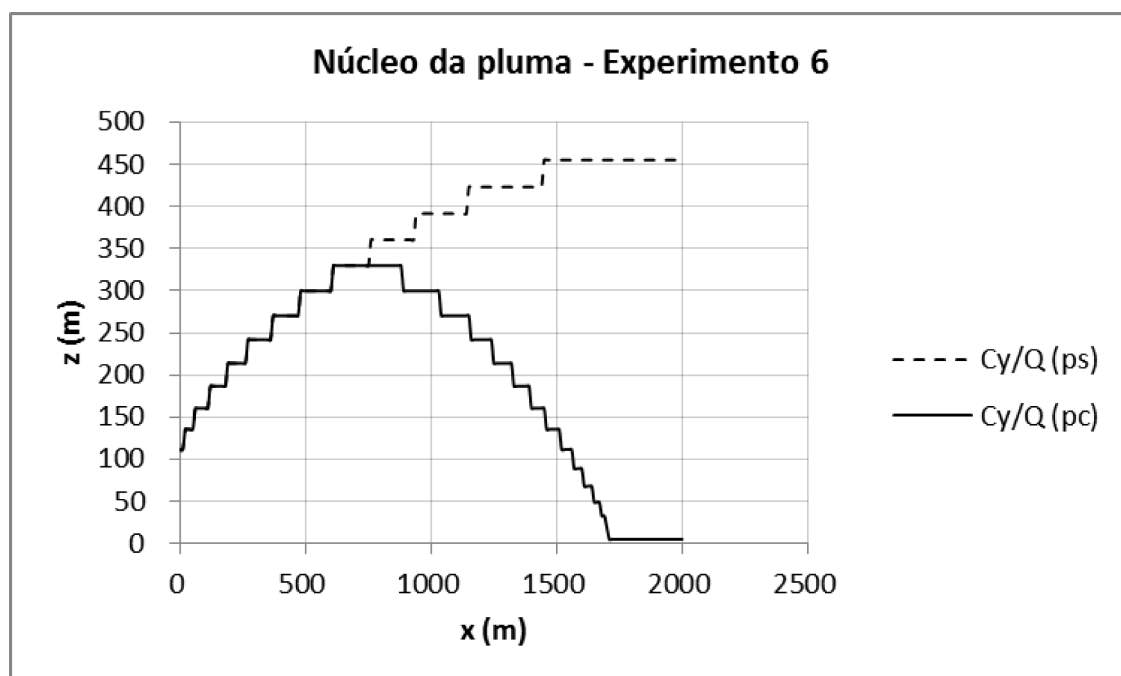


FIGURA A.12 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 7

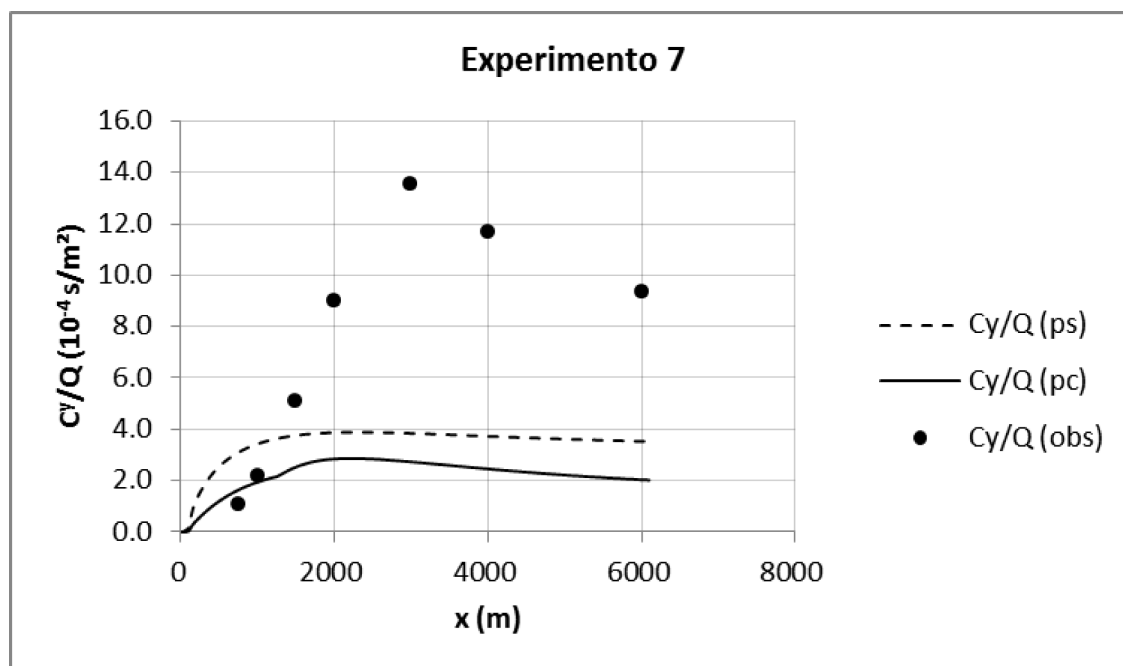


FIGURA A.13 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

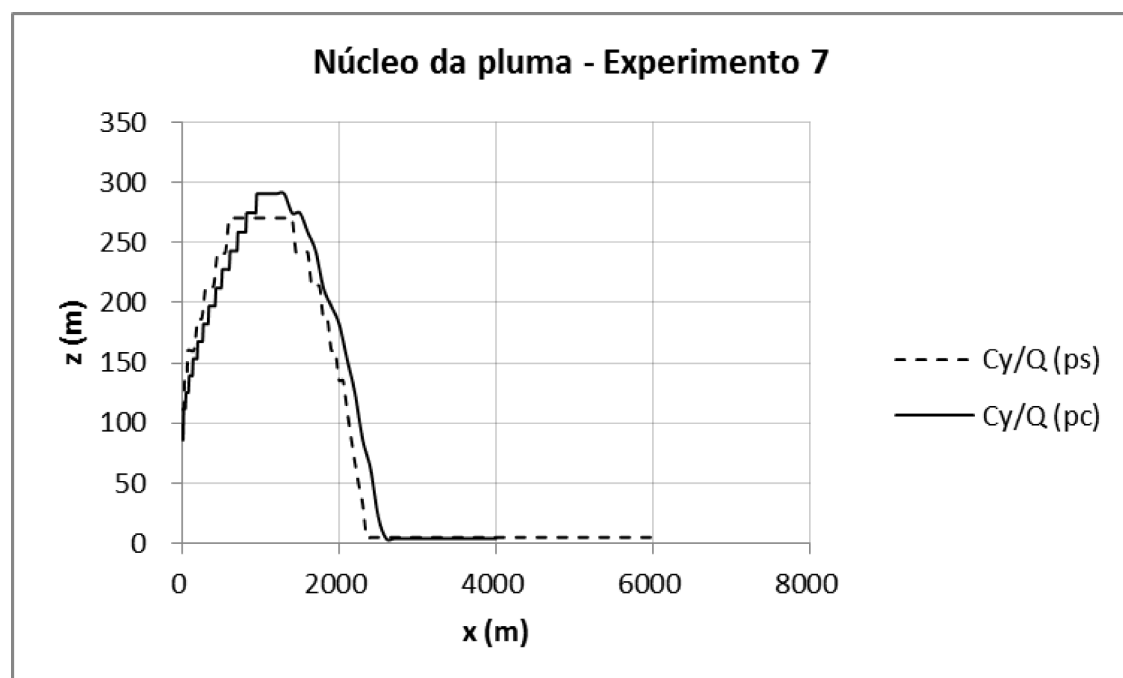


FIGURA A.14 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 8

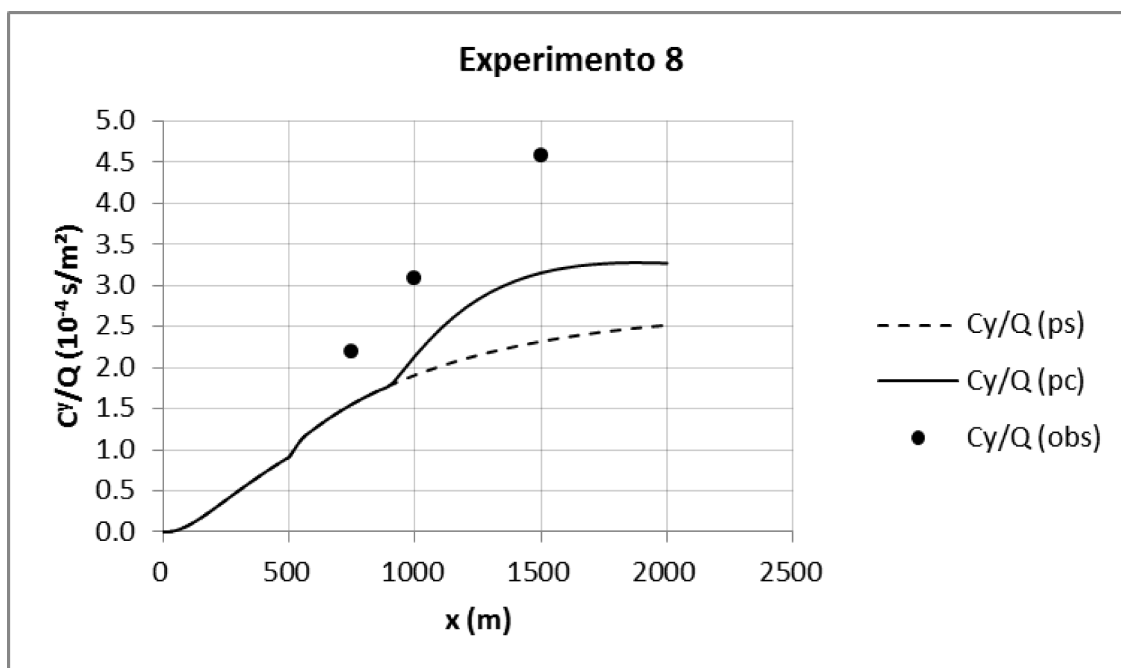


FIGURA A.15 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

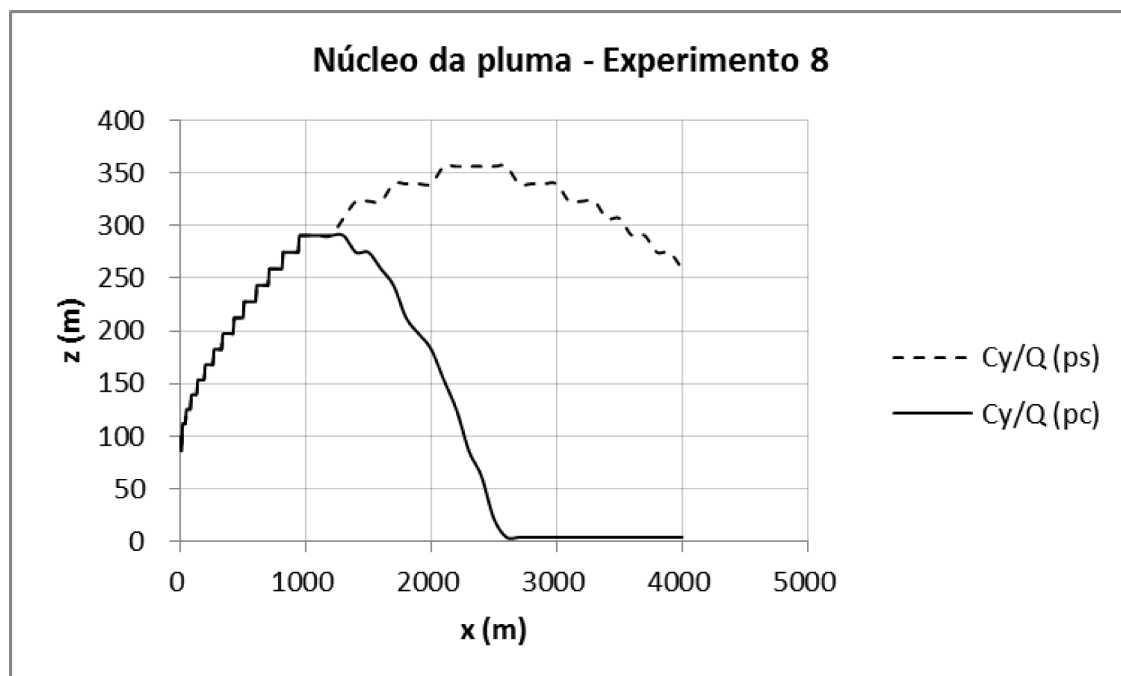


FIGURA A.16 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 9

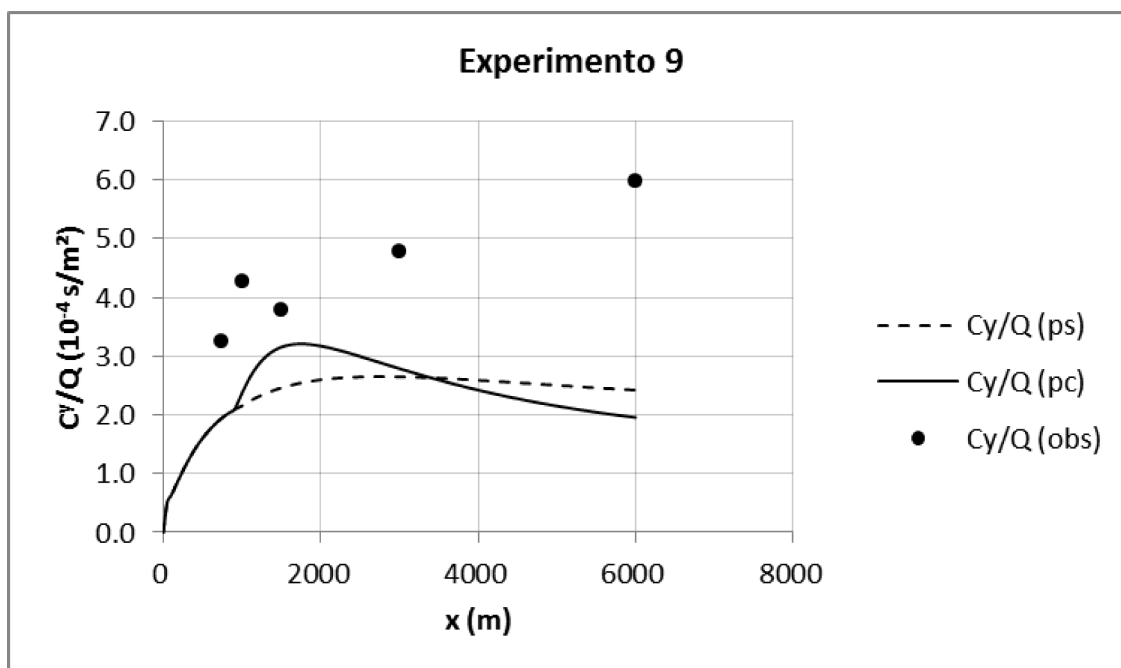


FIGURA A.17 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

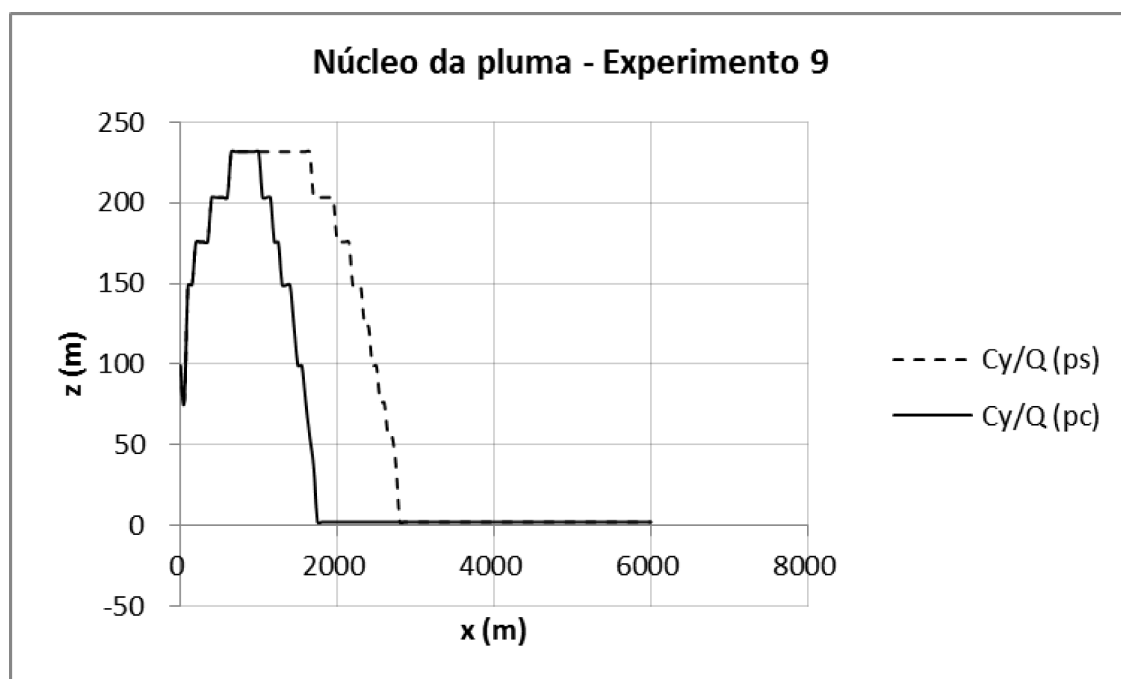


FIGURA A.18 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 10

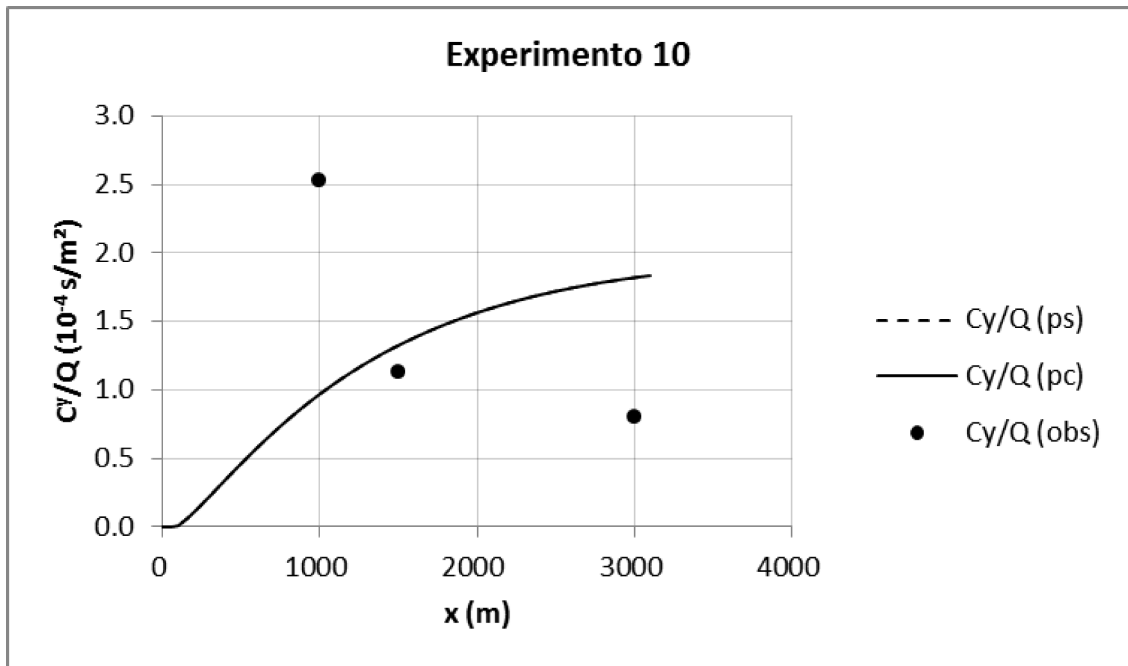


FIGURA A.19 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

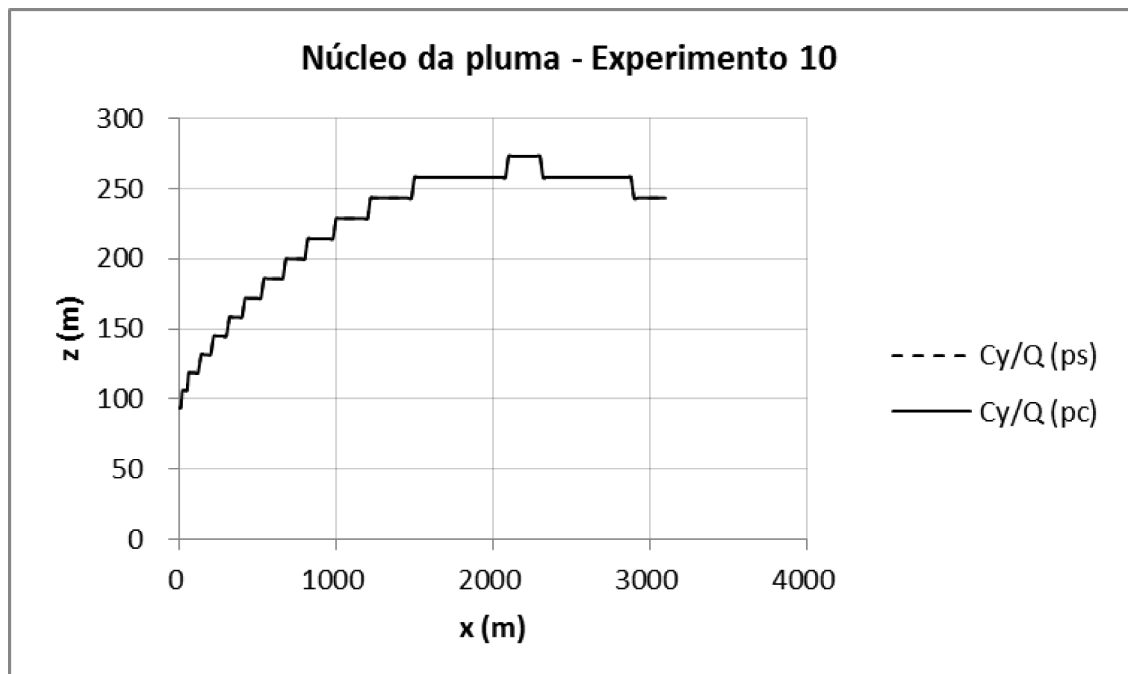


FIGURA A.20 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 11

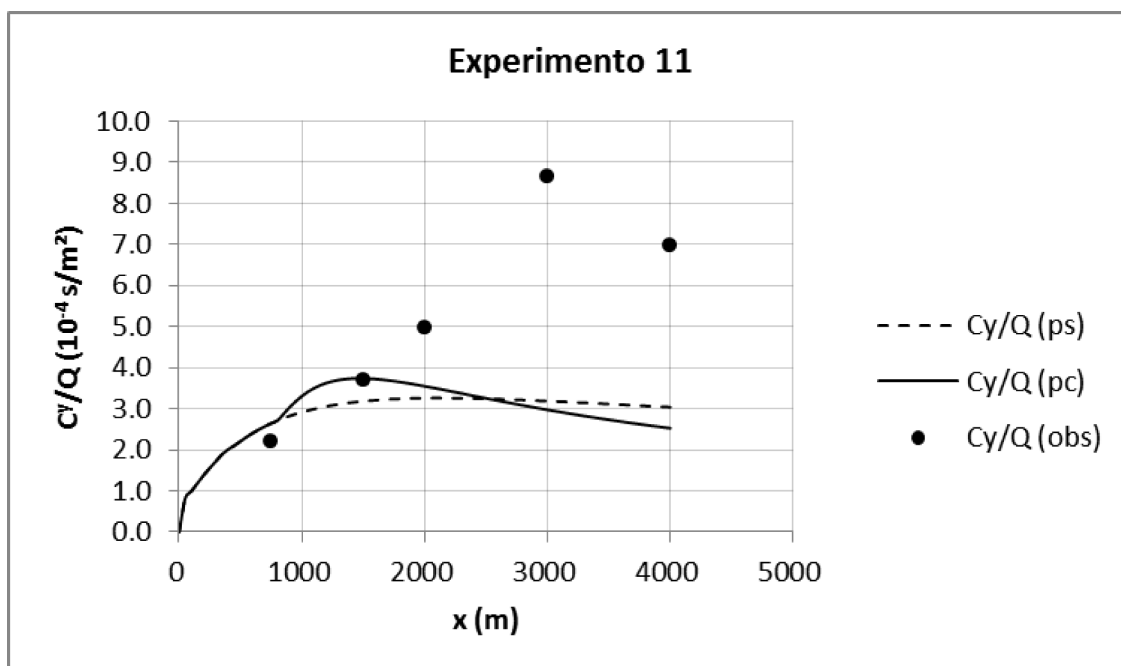


FIGURA A.21 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

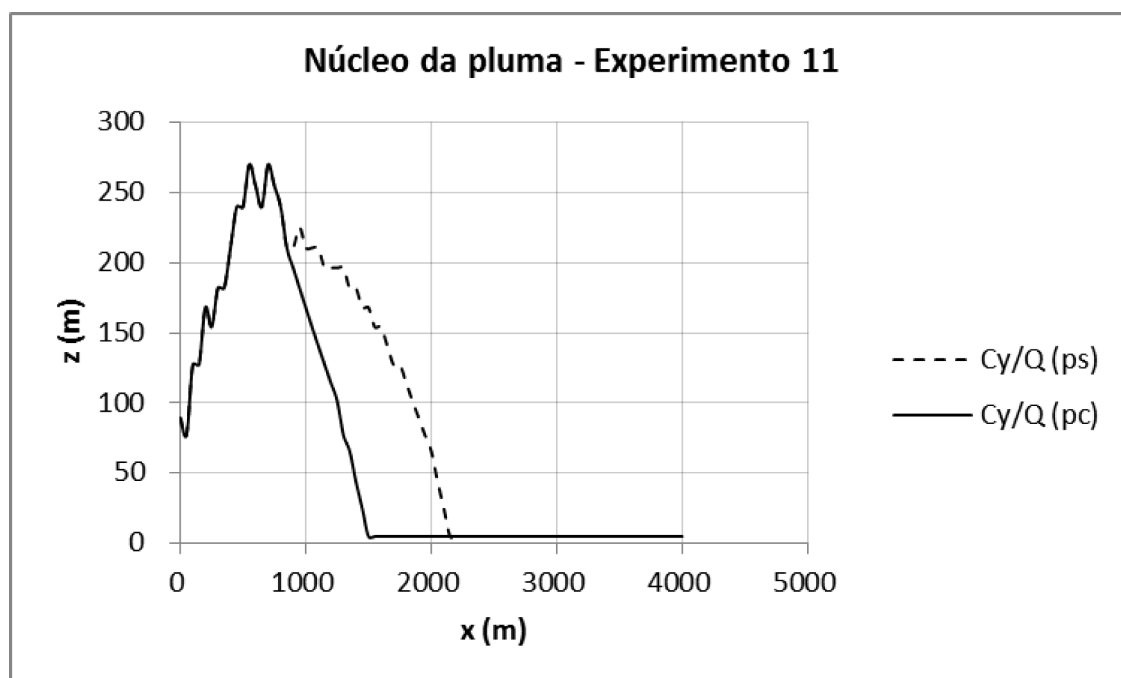


FIGURA A.22 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

APÊNDICE 2 – GRÁFICOS DOS EXPERIMENTOS ESTÁVEIS

EXPERIMENTO 1

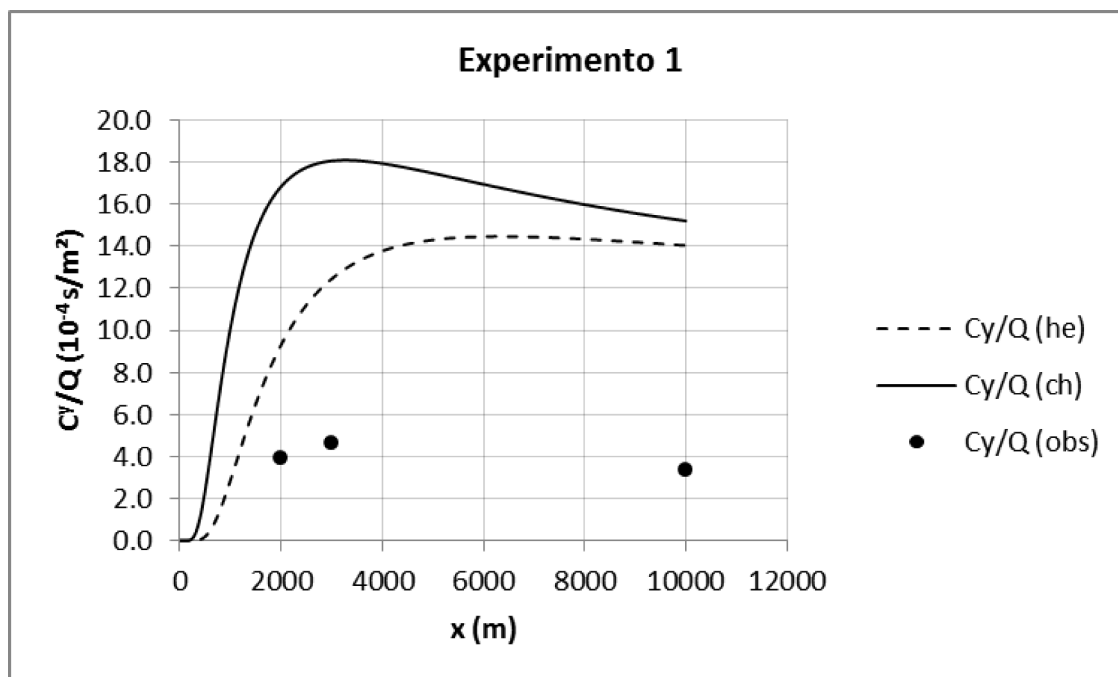


FIGURA A.23 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

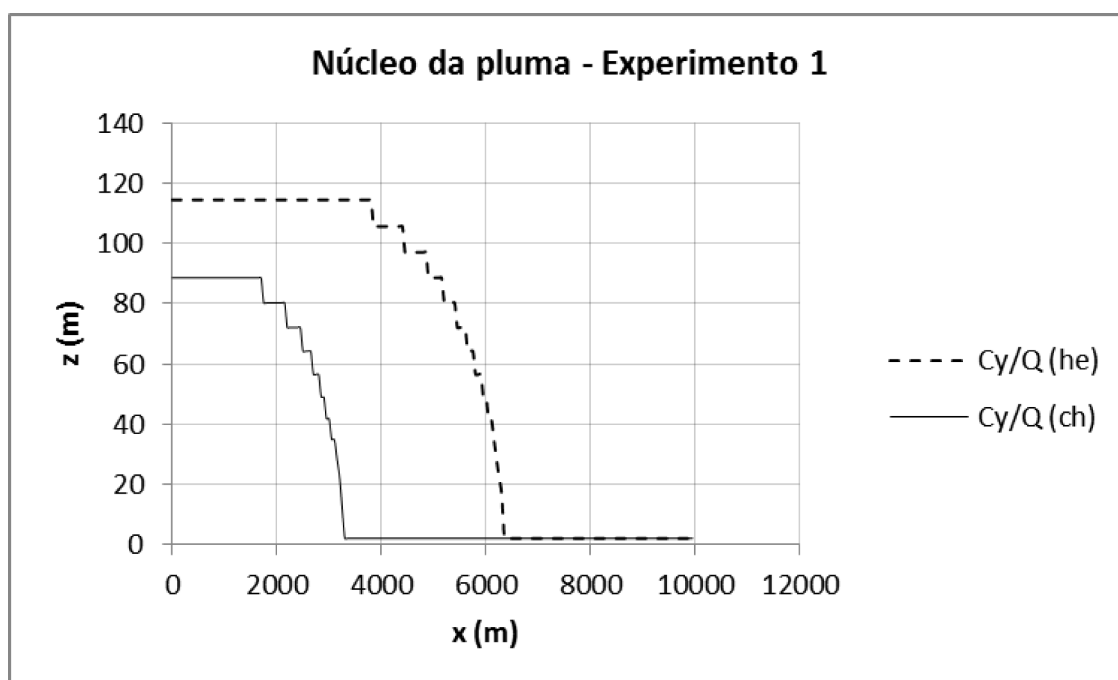


FIGURA A.24 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 2

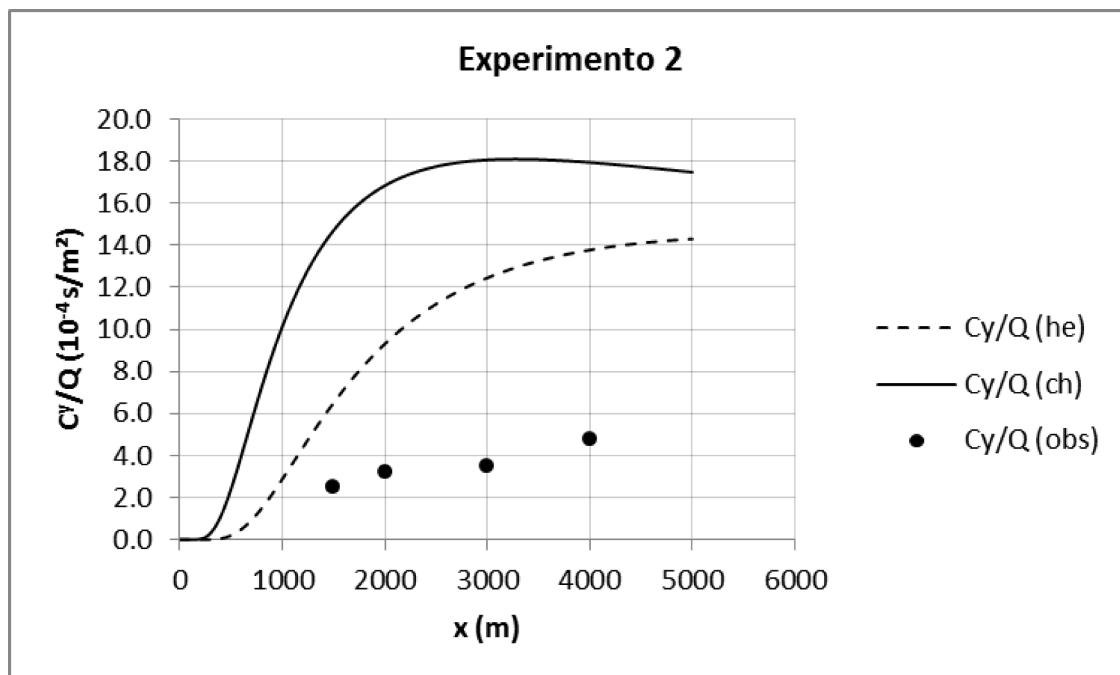


FIGURA A.25 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

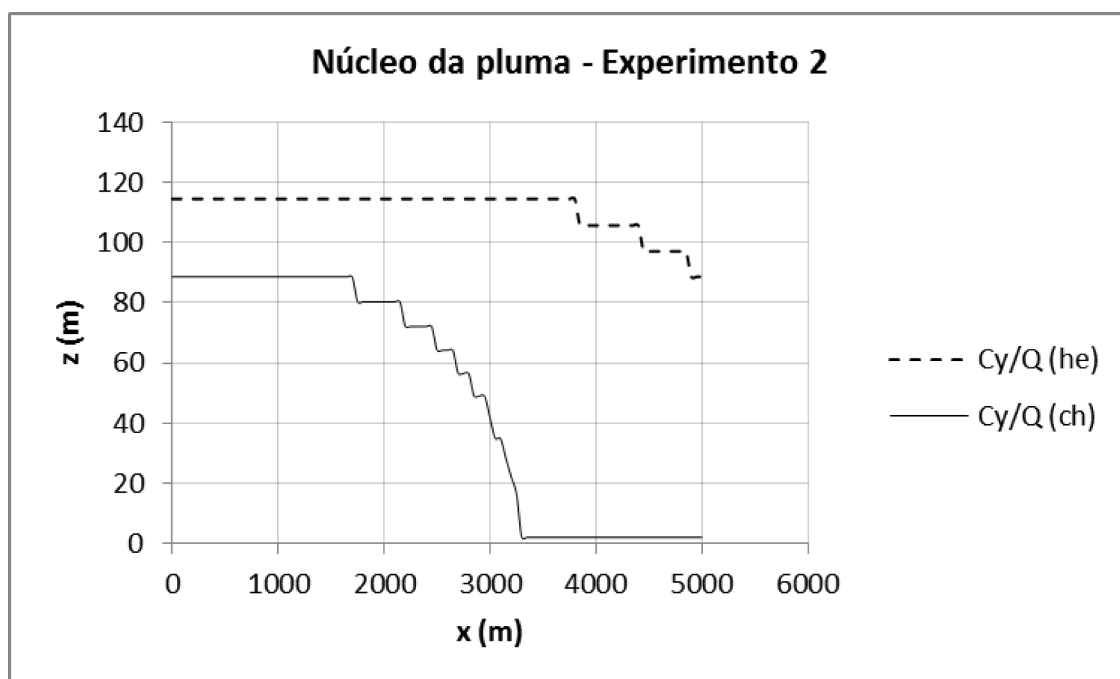


FIGURA A.26 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 3

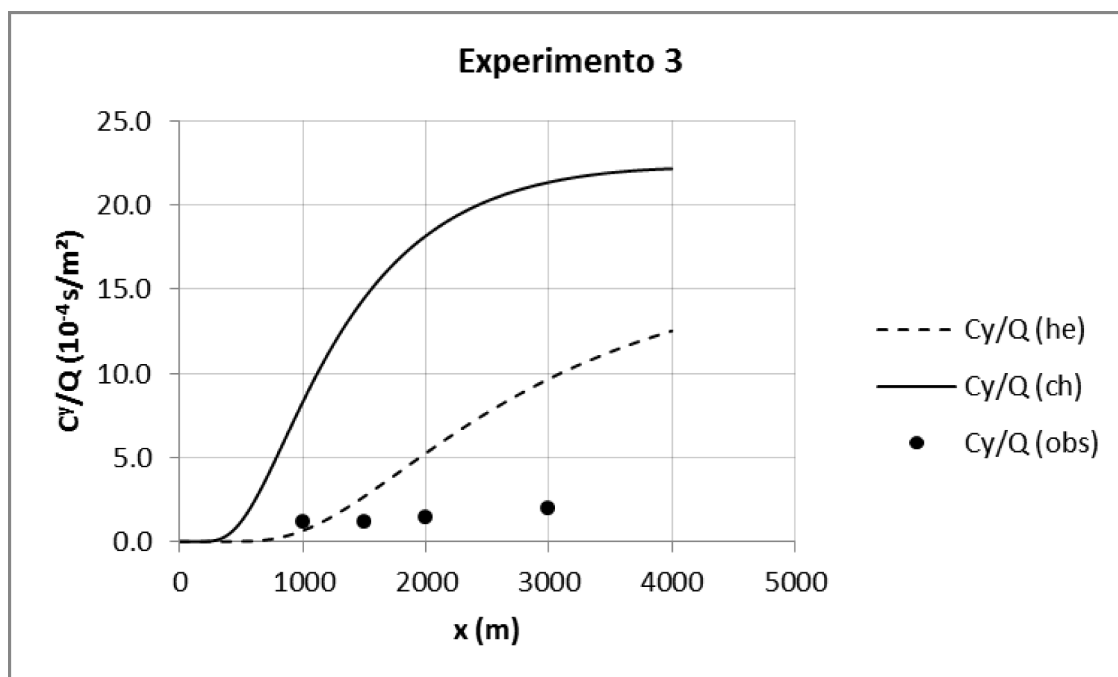


FIGURA A.27 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

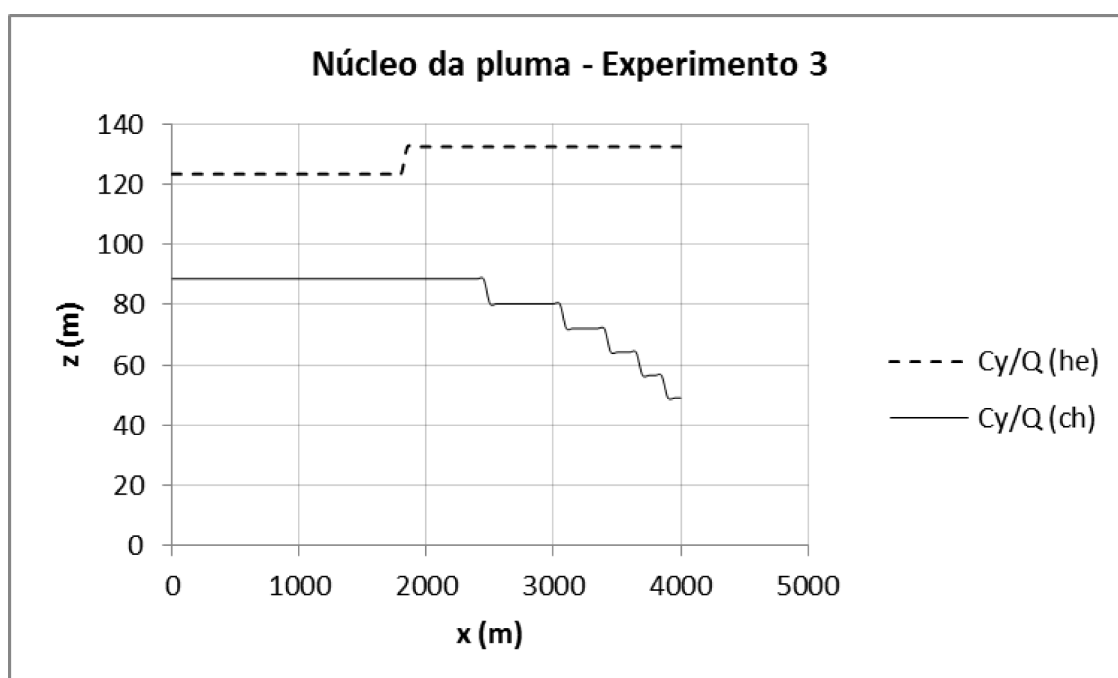


FIGURA A.28 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 4

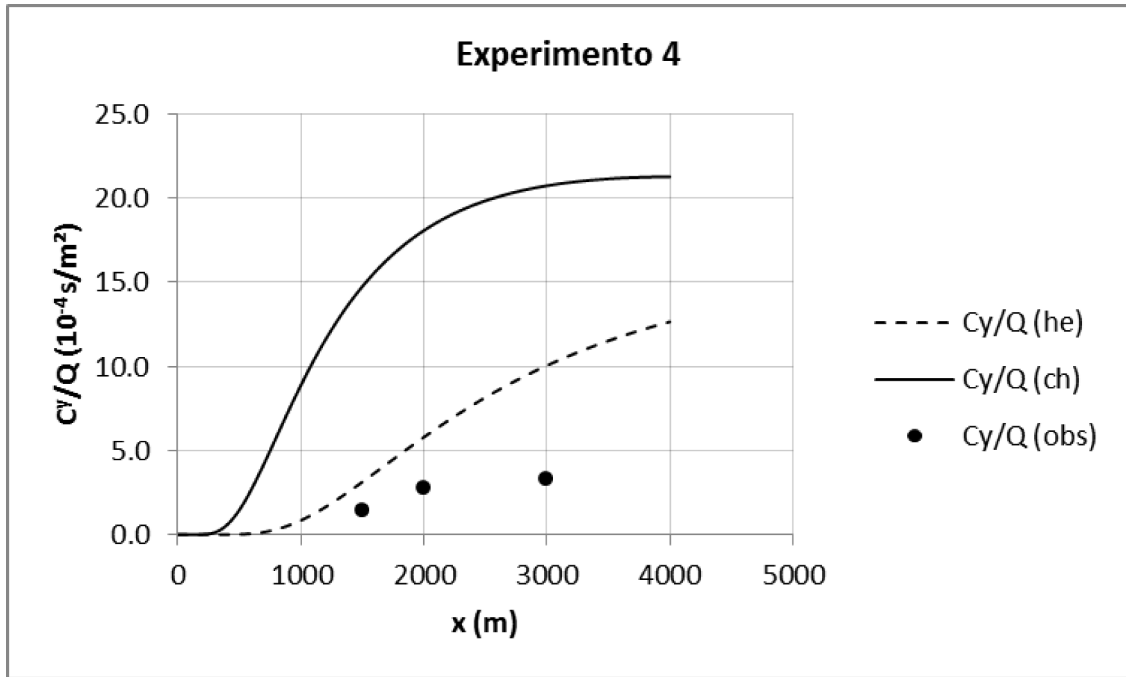


FIGURA A.29 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

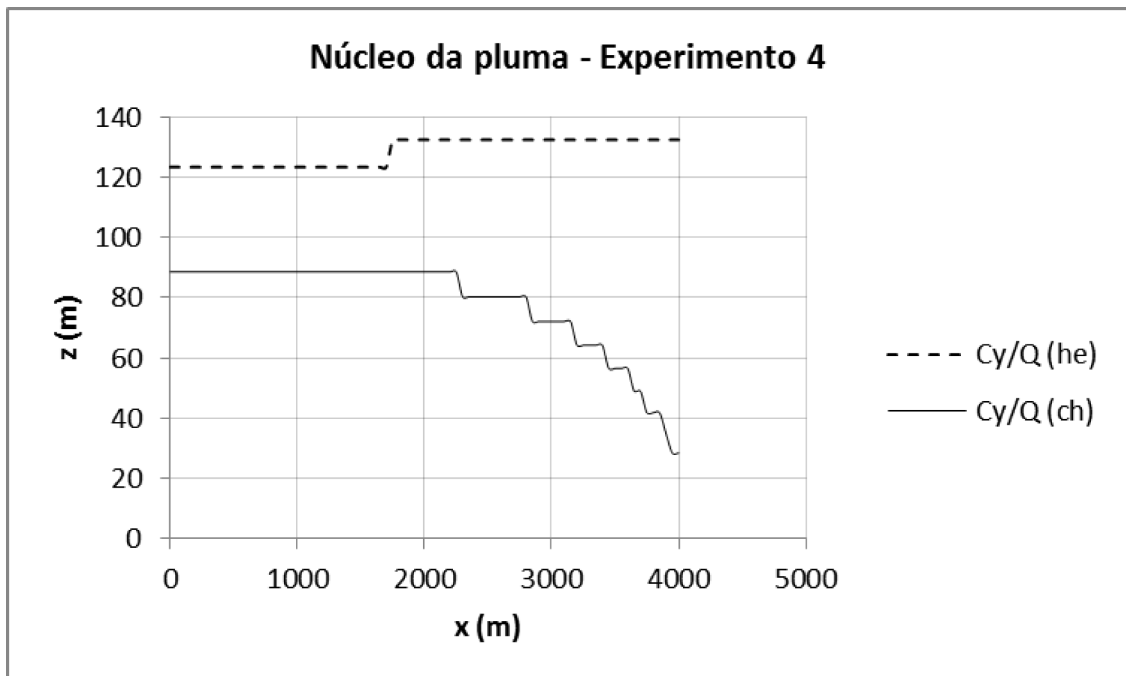


FIGURA A.30 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 5

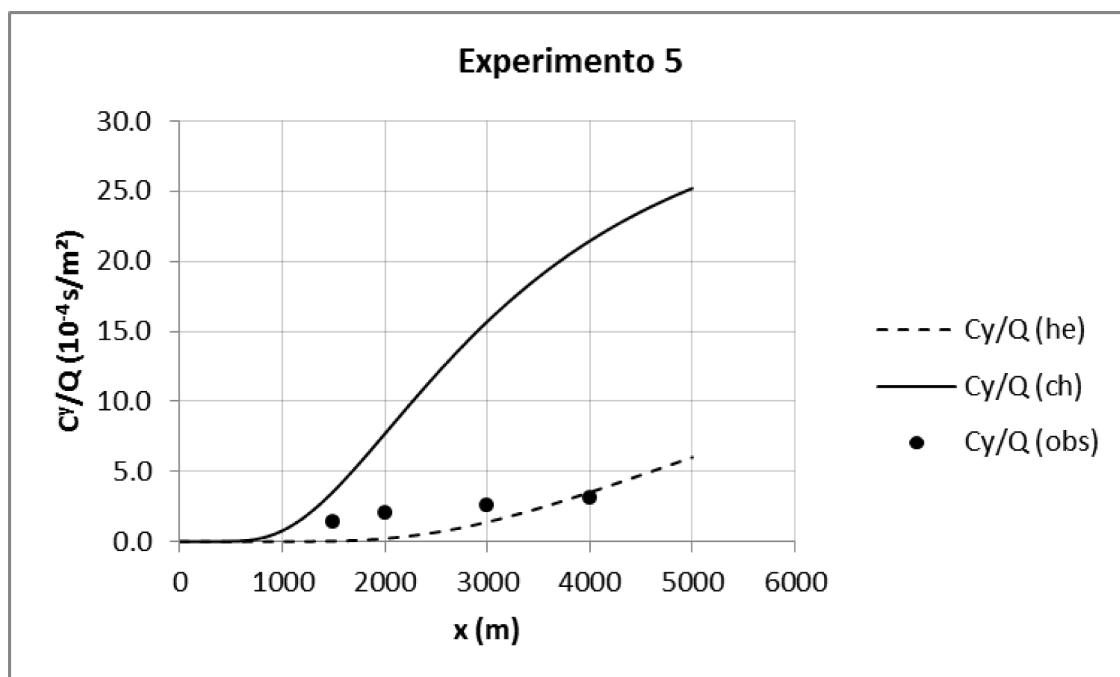


FIGURA A.31 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

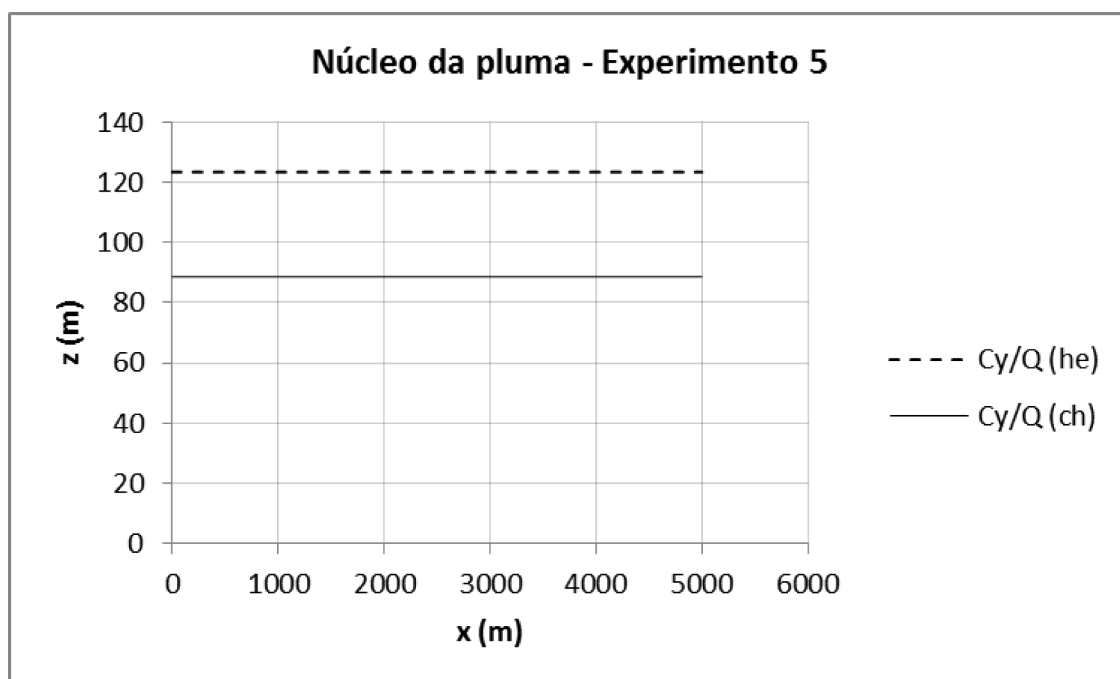


FIGURA A.32 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 6

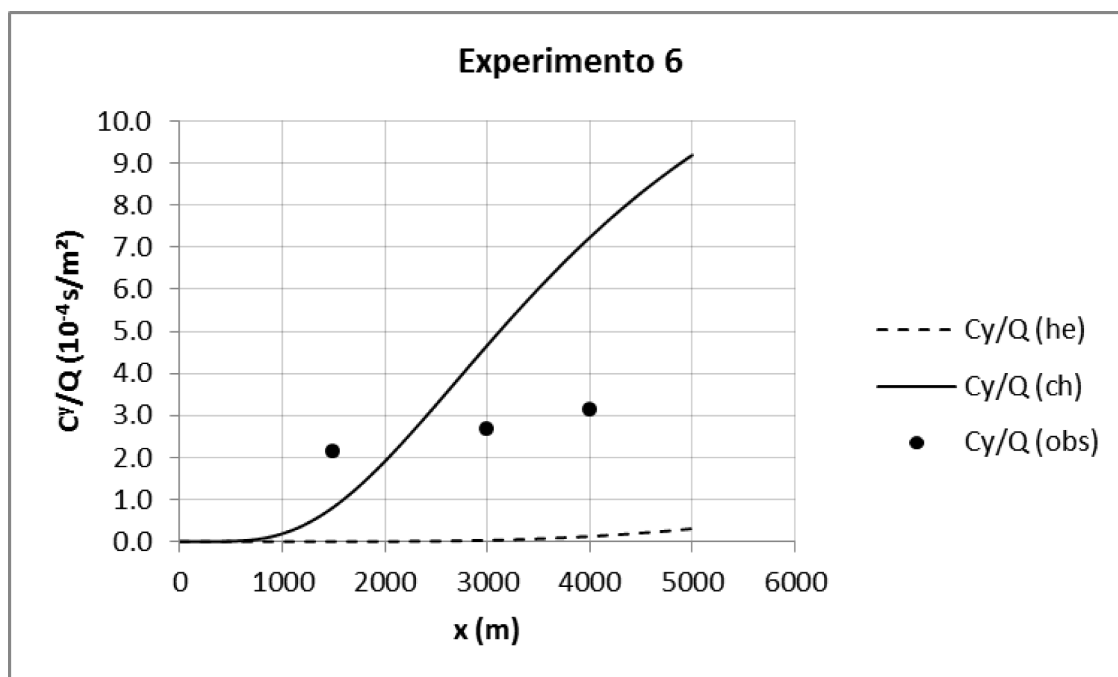


FIGURA A.33 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

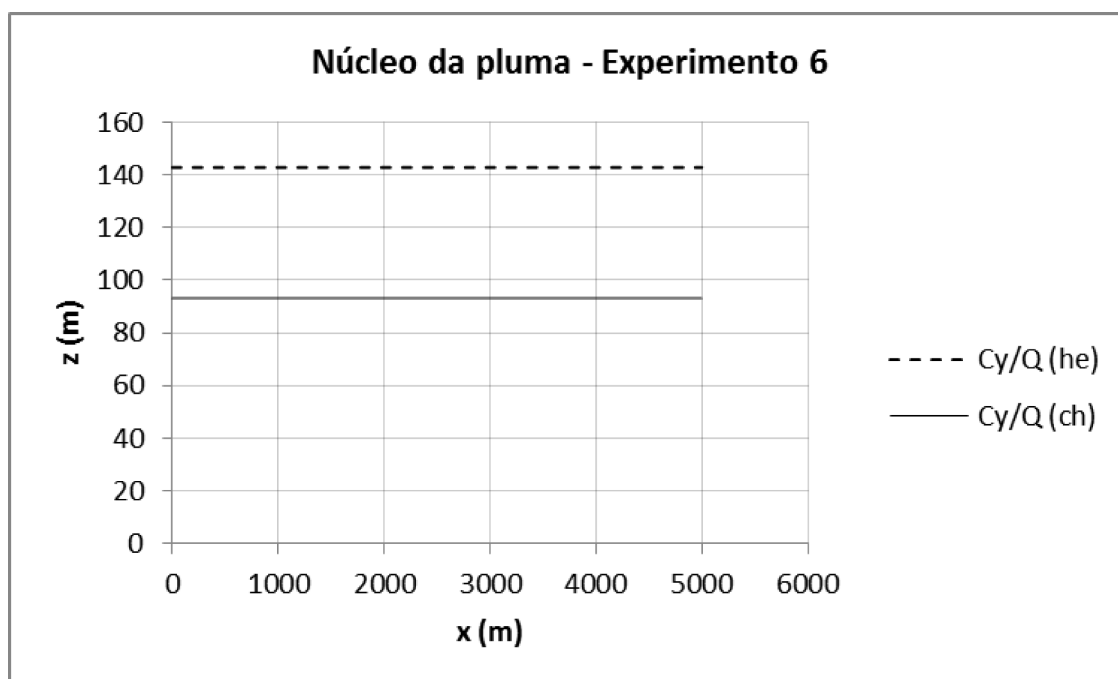


FIGURA A.34 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 7

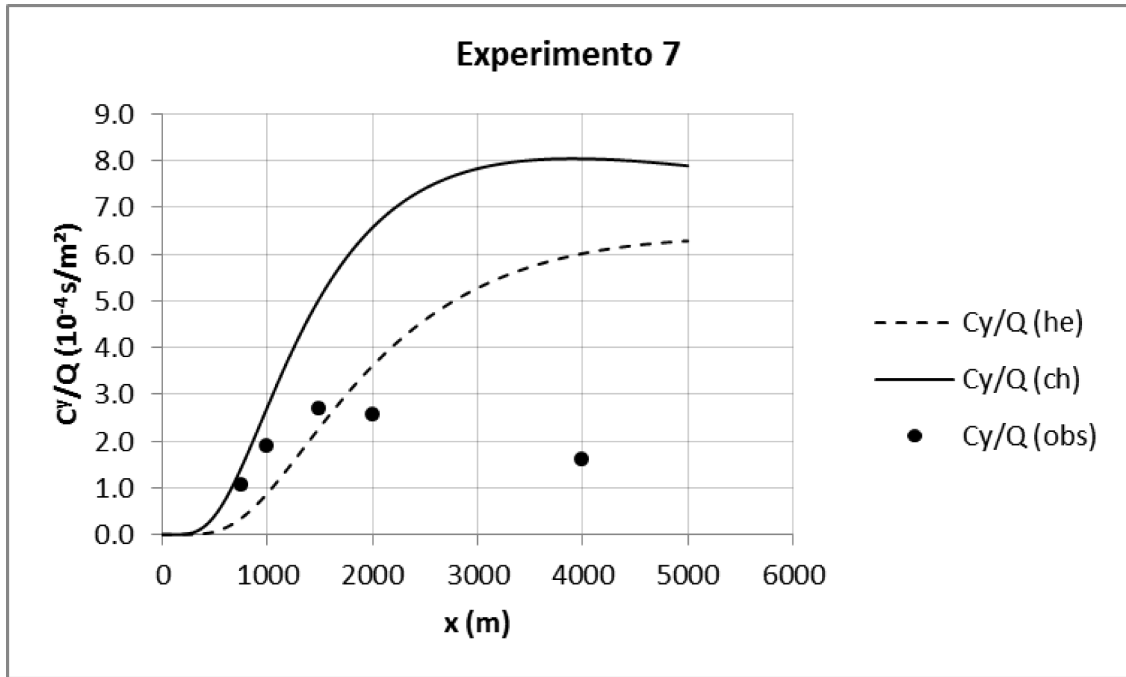


FIGURA A.35 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

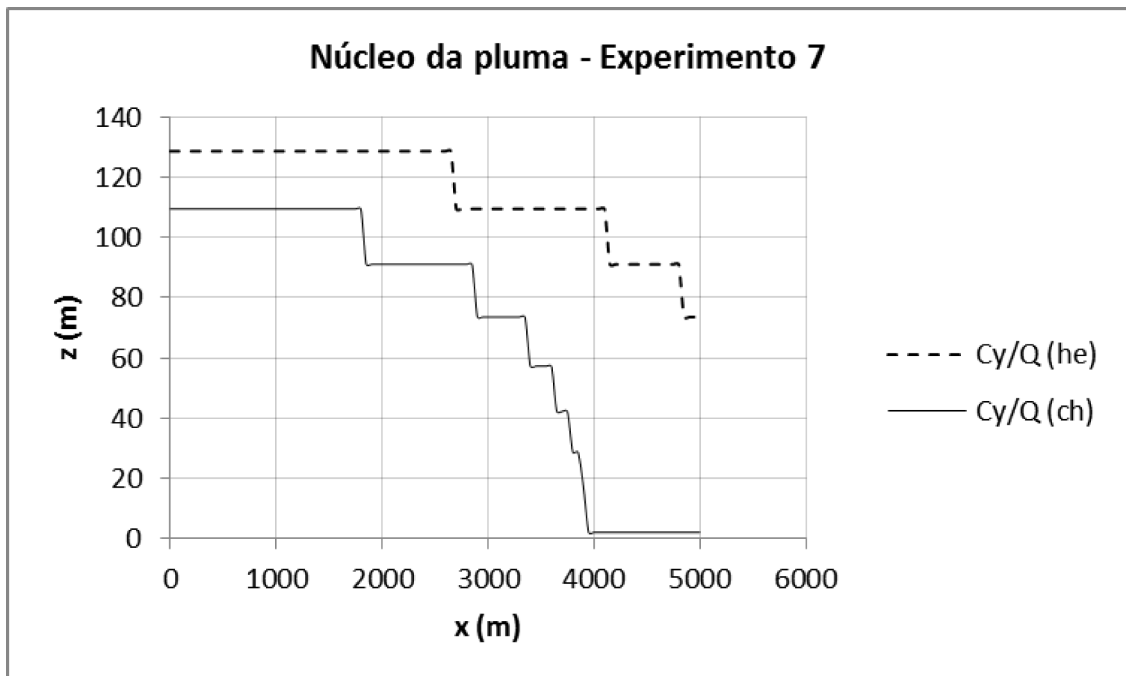


FIGURA A.36 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 8

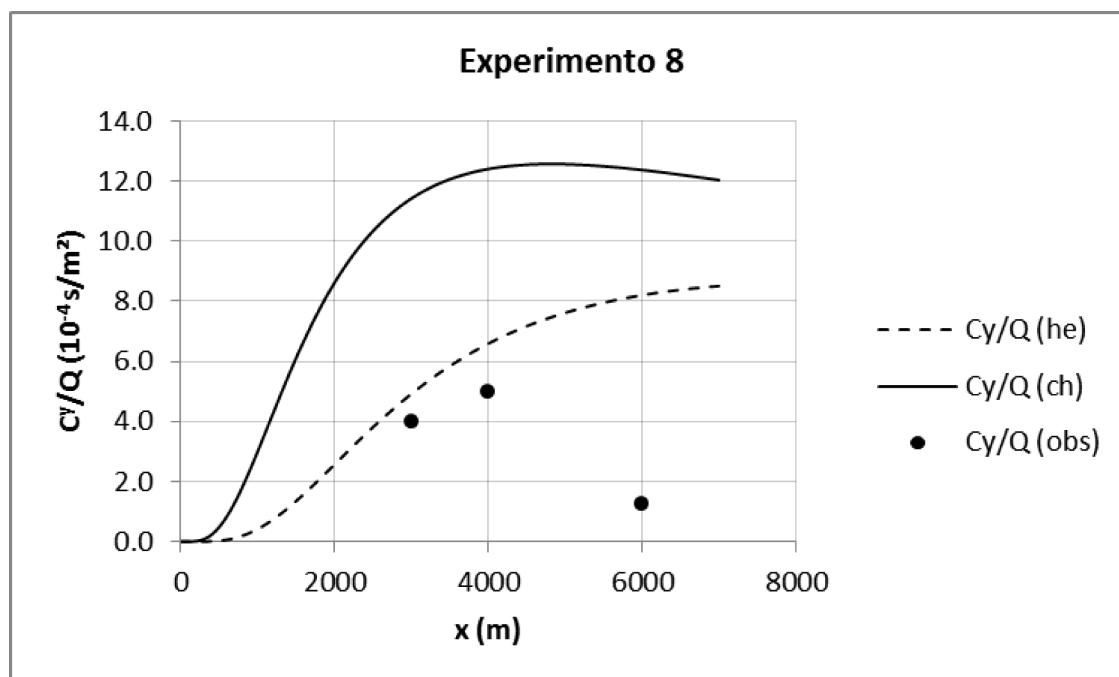


FIGURE A.37 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

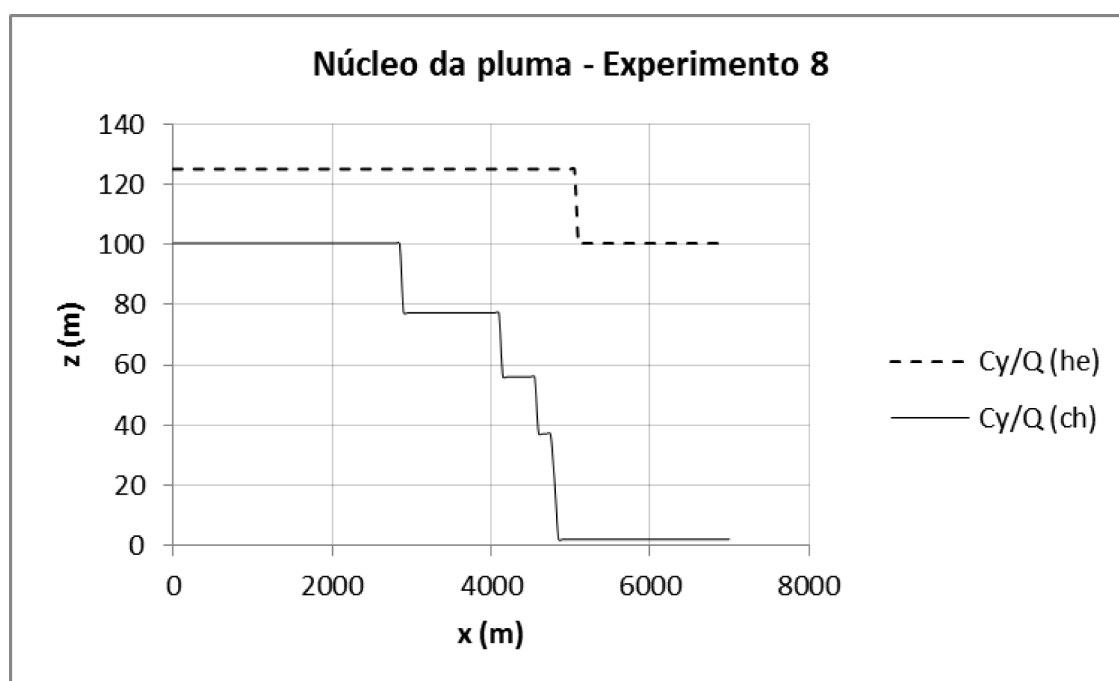


FIGURA A.38 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 9

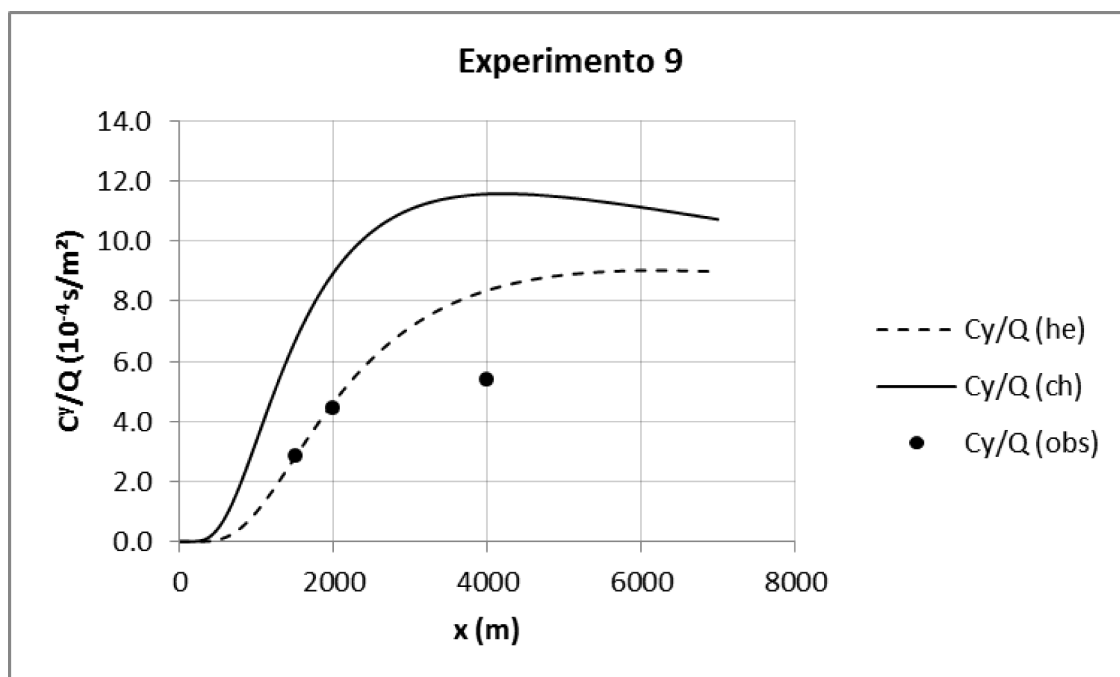


FIGURA A.39 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

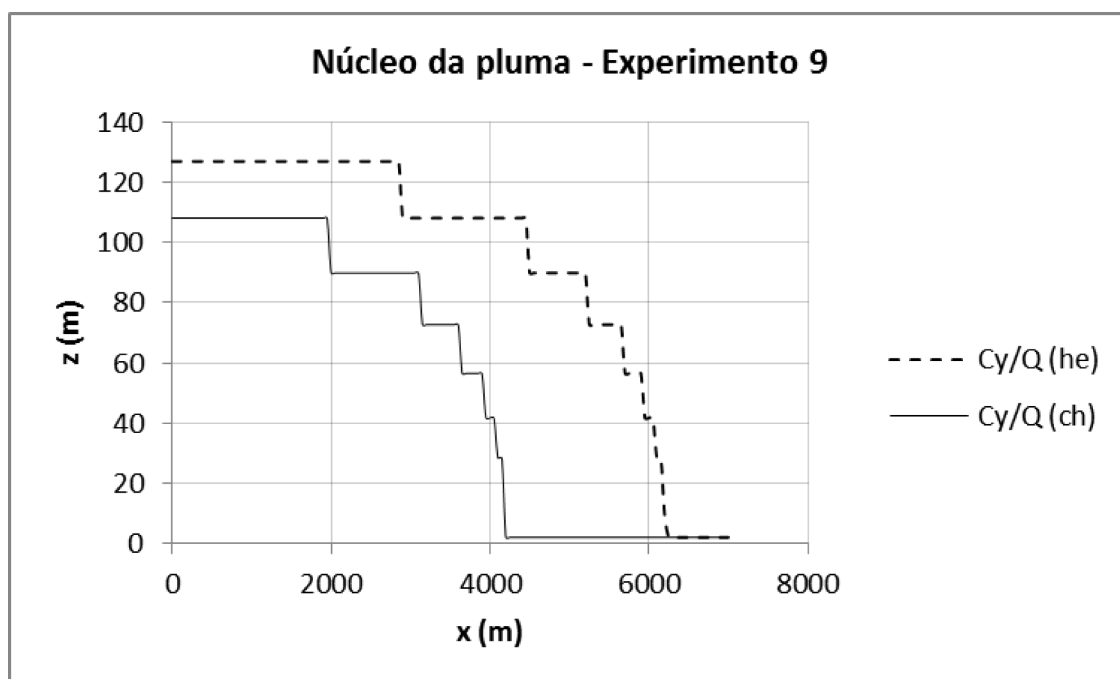


FIGURA A.40 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 10

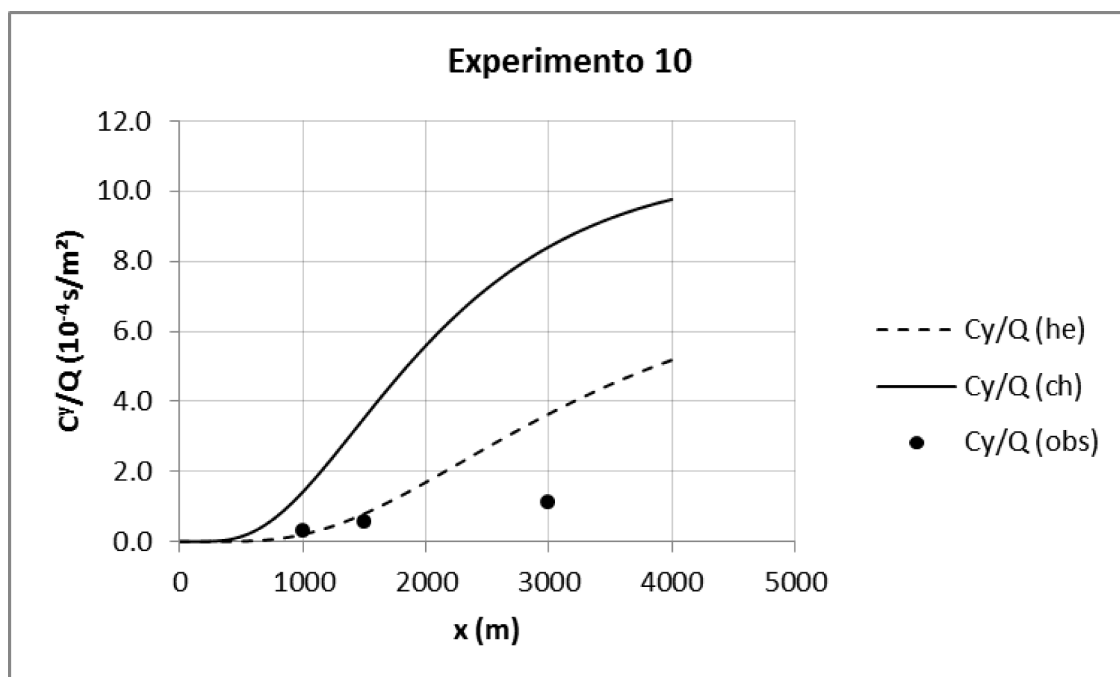


FIGURA A.41 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

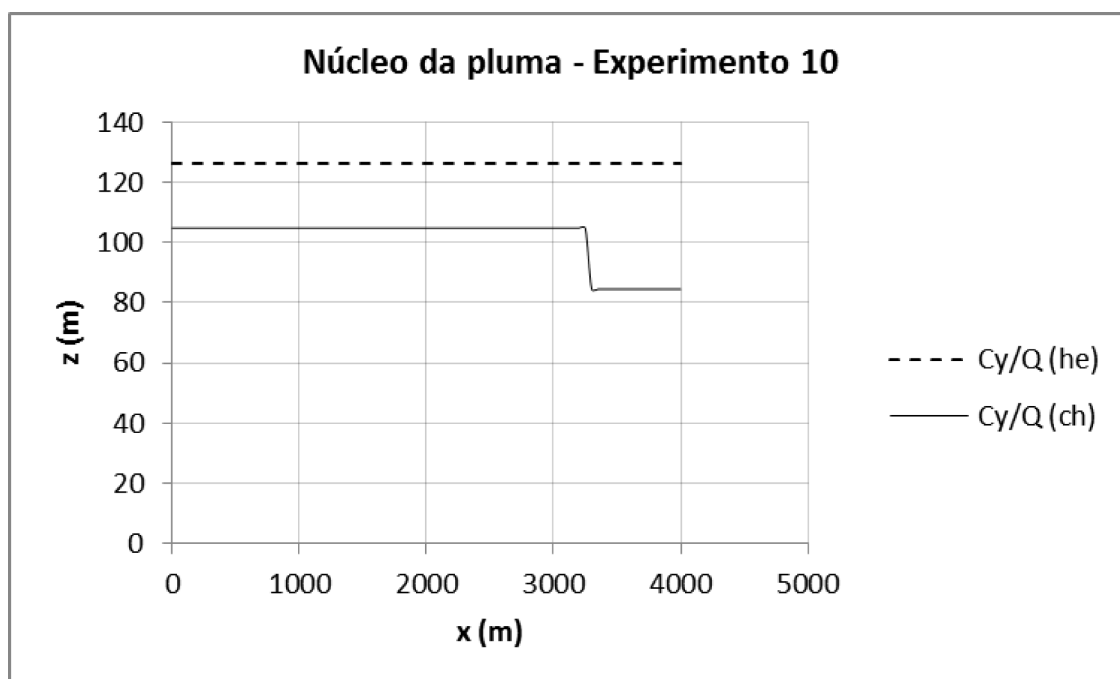


FIGURA A.42 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

EXPERIMENTO 11

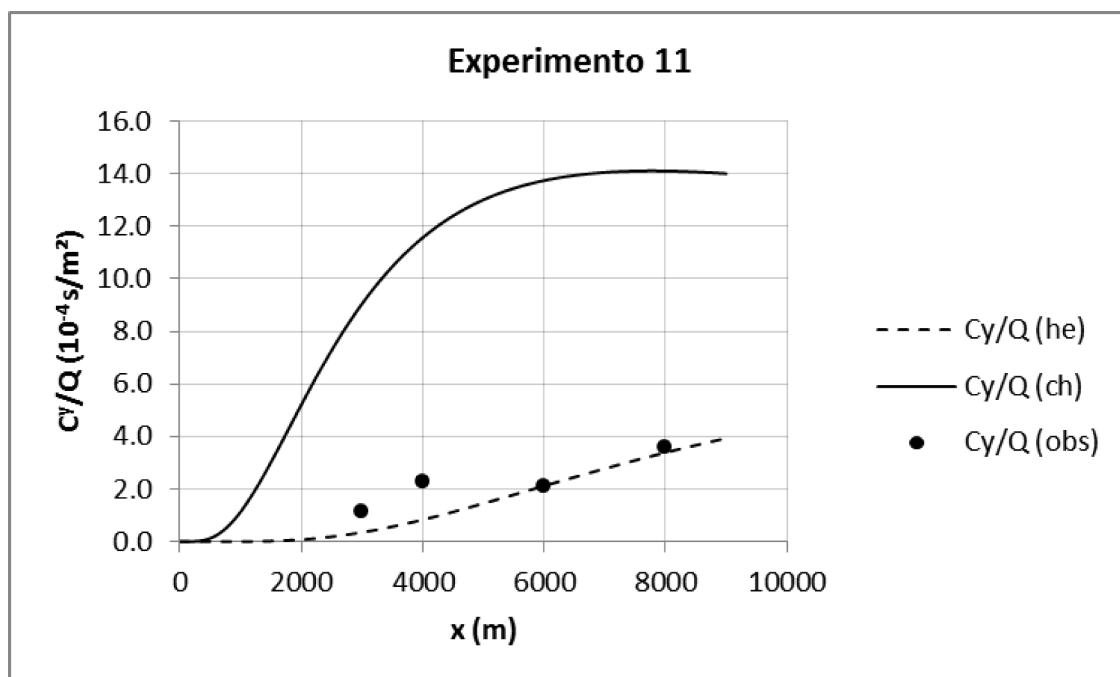


FIGURA A.43 – CONCENTRAÇÕES INTEGRADAS E NORMALIZADAS PREVISTAS E OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE.

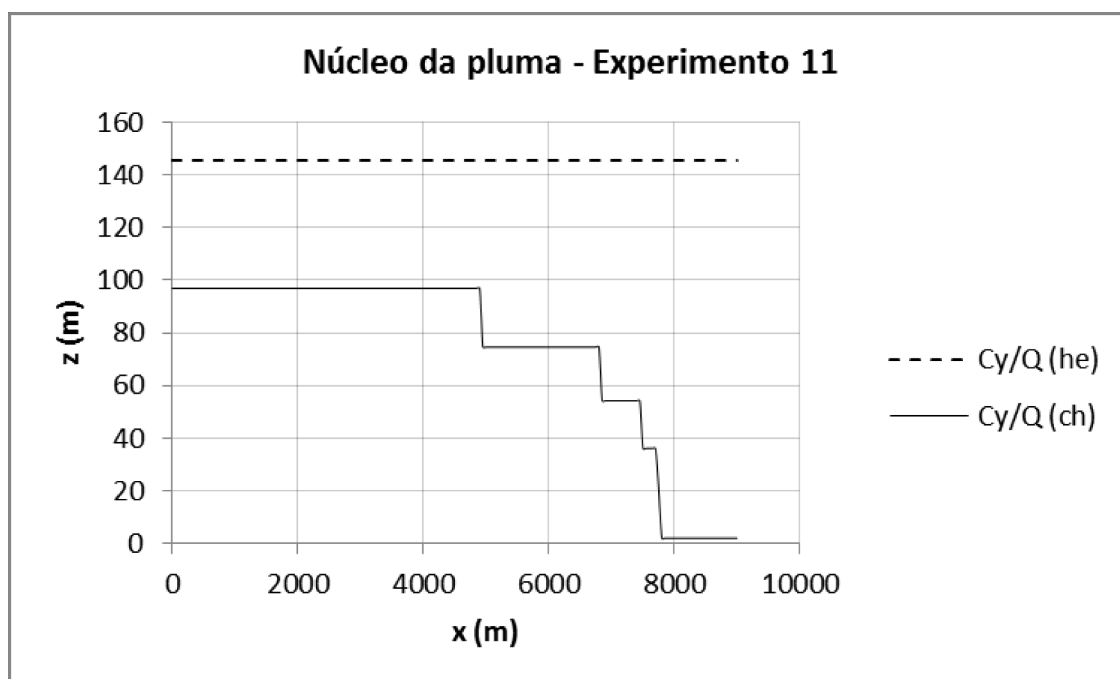


FIGURA A.44 – ALTURA ONDE SÃO OBSERVADAS AS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS NORMALIZADAS INTEGRADAS NO NÚCLEO DA PLUMA.

ANEXOS

ANEXO 1 – FORMULAÇÕES DE LEVANTAMENTO DE PLUMA	102
--	-----

ANEXO 1 – FORMULAÇÕES DE LEVANTAMENTO DE PLUMA

FÓRMULA DE DAVIDSON-BRYANT (1949)

Fórmula empírica baseada em observações de plumas:

$$\Delta h = d \left(\frac{w_s}{u} \right)^{1,4} \left(1 + \frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \quad (38)$$

onde d é o diâmetro da chaminé em metros, w_s é a velocidade de emissão do poluente em m/s , u é a velocidade média do vento na altura da chaminé (m/s), T é a temperatura ($^{\circ}C$), e os índices s e a se referem, respectivamente, ao efluente e ao ambiente.

FÓRMULA DE HOLLAND (1953)

Formulação empírica, baseada em testes em túneis de vento e dados de chaminés:

$$\Delta h = \frac{1,5w_s d + 9,56 \cdot 10^{-6} Q_h}{u} \quad (39)$$

onde Q_h é a taxa do fluxo de calor ($kcal/s$).

FÓRMULA DE STUMKE

$$\Delta h = \frac{1}{u} \left[1,5w_s d + 65d^{3/2} \left(\frac{T_a - T_s}{T_s} \right)^{1/4} \right] \quad (40)$$

FÓRMULA DE LUCAS-MOORE-SPURR (1963)

Fórmula empírica baseada em medidas de plumas de plantas térmicas.

$$\Delta h = \left[1,36 \frac{Q_h^{1/4}}{u} \right] \quad (41)$$

FÓRMULA DE RAUCH

Baseada em observações de chaminés.

$$\Delta h = \left[1,13 \cdot 10^{-2} \frac{Q_h^{1/4}}{u} \right] \quad (42)$$

FÓRMULA DE STONE-CLARK (1967)

Modificação da fórmula de Lucas-Moore-Spurr de 1963.

$$\Delta h = \left[(2,49 \cdot 10^{-2} + 4,09 \cdot 10^{-5} h_s) \frac{Q_h^{1/4}}{u} \right] \quad (43)$$

FÓRMULAS DE CARSON-MOSES PARA CLASSES DE ESTABILIDADE (1967)

Baseadas em técnicas de regressão para coeficientes de cada classe de estabilidade.

Instável:

$$\Delta h = \left[-1,28 \frac{w_s d}{u} + 3,74 \cdot 10^{-3} \frac{Q_h^{1/2}}{u} \right] \quad (44)$$

Neutra:

$$\Delta h = \left[3,72 \frac{w_s d}{u} + 7,53 \cdot 10^{-4} \frac{Q_h^{1/2}}{u} \right] \quad (45)$$

Estável:

$$\Delta h = \left[1,22 \frac{w_s d}{u} + 1,17 \cdot 10^{-3} \frac{Q_h^{1/2}}{u} \right] \quad (46)$$

FÓRMULA DE MOSES-CARSON (1968)

Baseada em observações e técnicas de regressão.

$$\Delta h = A \left[-0,029 \frac{w_s d}{u} + 1,28 \cdot 10^{-3} \frac{Q_h^{1/2}}{u} \right] \quad (47)$$

Para classes de estabilidade:

instável: $A = 2,65$;

neutra: $A = 1,08$; e,

estável: $A = 0,68$.

FÓRMULAS DE BRIGGS PARA CLASSES DE ESTABILIDADE (1975)

Baseadas em análise dimensional, para classes de estabilidade:

Neutra:

$$\Delta h = 1,3 \frac{F_b}{u u_*^2} \left(1 + \frac{h_s}{\Delta h} \right)^{2/3} \quad (48)$$

Estável com vento:

$$\Delta h = 2,6 \left(\frac{F_b}{u s} \right)^{1/3} \quad (49)$$

Estável sem vento:

$$\Delta h = 5 \frac{F_b^{1/4}}{s^{3/8}} \quad (50)$$

onde s é o parâmetro de estabilidade:

$$s = \frac{g}{T_a} \frac{\partial \theta_a}{\partial z} \quad (51)$$

FÓRMULA DE HOUYOUX (1998)

Estável:

$$\Delta h = 2,6 \left(\frac{F_b}{us} \right)^{1/3} \quad (52)$$

Neutra:

$$\Delta h = 1,2 \left[\frac{F_b}{uu_*^2} \right]^{3/5} \left[h_s + 1,3 \frac{F_b}{uu_*^2} \right]^{3/5} \quad (53)$$

Instável:

$$\Delta h = 30 \left[\frac{F_b}{u} \right]^{3/5} \quad (54)$$

Houyoux (1998) também obteve uma formulação para os casos em que a quantidade de movimento é predominante em relação ao empuxo, no levantamento da pluma:

$$\Delta h = 3 \left(\frac{dw_s}{u} \right). \quad (55)$$

Para $T_s > T_a$, F_b é obtido pela equação (10), e se $T_s \leq T_a$, $F_b = 0$. O parâmetro de estabilidade (s) é dado pela EQUAÇÃO (51).

**FONTES COM FLUXO DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO E FLUTUABILIDADE
SIGNIFICANTES - BRIGGS (1984)**

$$\Delta h = \left[\frac{3}{\beta_m} \frac{F_m}{u^2} x + \frac{3}{2\beta_b^2} \frac{F_b}{u^3} x^2 \right]^{1/3} \quad (56)$$

onde: $\beta_b \approx 0.6$, $\beta_m = 0,4 + 1,2u/w_s$, F_b é dado pela EQUAÇÃO (10), $\beta_m = \beta_b = 0,6$ e,

$$F_m = \frac{\rho_s}{\rho_a} r_s^2 w_s^4. \quad (57)$$

LIMITAÇÃO GEOMÉTRICA PARA ΔH - WEIL (1979)

Não há consideração sobre parâmetros da emissão e ambientais.

$$\Delta h = 0,62(z_i - h_s) \quad (58)$$