

A influência das condições meteorológicas na dispersão de vazamentos contínuos de cloro e propano

José Carlos de Moura Xavier, Sandro Roberto Tomaz, Moacir Ferreira da Silva
Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, Brasil

1. INTRODUÇÃO

Na elaboração de um estudo de análise de risco (EAR) – denominação adotada no Brasil equivalente a avaliação quantitativa de risco (AQR), adotada internacionalmente – a etapa de modelagem matemática de hipóteses envolvendo a liberação acidental para a atmosfera de gases e líquidos, inflamáveis e tóxicos requer adotar valores para as condições meteorológicas temperatura, umidade relativa, velocidade e direção do vento.

Tipicamente, esses valores são médias aritméticas sobre uma série histórica de anos recentes, com medições provenientes de estações meteorológicas operadas pelo empreendedor ou, predominantemente, públicas, com dados disponibilizados livremente. Na ausência de medições apropriadas dessas condições é comum o uso de valores *default* [1].

Em 2014, a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo disponibilizou um portal de informações ambientais e territoriais georreferenciadas denominado DATAGEO [2]. Entre as informações, encontram-se valores para as condições acima mencionadas e a categoria de estabilidade de Pasquill para áreas de até 30km de raio no entorno das estações de monitoramento da qualidade do ar operadas pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB e que contam com estações meteorológicas acopladas. Detalhes sobre a abrangência das informações e o método de estimação de cada parâmetro encontram-se no artigo Condições Meteorológicas para Uso na Elaboração de Estudo de Análise de Risco, dos mesmos autores deste texto.

2. OBJETIVO DO TRABALHO

Investigar a influência das condições meteorológicas e da categoria de estabilidade de Pasquill na dispersão atmosférica de cloro e de propano associada a hipóteses acidentais típicas de instalações industriais. São consideradas três situações: (i) um conjunto de simulações de efeitos físicos considerando condições meteorológicas *default* previstas na norma CETESB P4.261 [1] e (ii) dois outros conjuntos considerando condições distintas das *default*, provenientes do DATAGEO.

3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO REALIZADO

Considera-se duas hipóteses acidentais, típicas de empreendimentos industriais. As hipóteses 1 e 2 abordam as rupturas catastróficas de tubulações de duas polegadas de tanques de armazenamento de cloro e de propano, respectivamente, mantidos liquefeitos por efeito de pressão. As tubulações destinam-se à transferência das fases líquidas dos tanques para consumo. O quadro 1 traz algumas características dos tanques, das tubulações e das substâncias requeridas nas simulações.

Quadro 1 – Características dos tanques e das tubulações de cloro e de propano e dessas substâncias

Característica	Tanque	
Substância armazenada	Cloro (CAS 7782-50-5)	Propano (CAS 74-98-6)
Massa armazenada (kg)	50.000	10.000
Temperatura de armazenamento (°C)	25	25
Líquido saturado	sim	sim
Altura da fase líquida (m)	2	2
Comprimento do tubo (m)	1	1
Rugosidade do tubo (mm)	0,0457	0,0457
Altura do tubo (m)	1	1

As simulações foram realizadas com o *software* Phast, versão 6.7 [3]. Utilizou-se o modelo vaso-tubo e o cenário ruptura de linha. O quadro 2 traz alguns parâmetros necessários ao simulador, os quais foram mantidos idênticos para as duas hipóteses, sempre que possível.

Quadro 2 – Parâmetros de interesse para o software Phast, versão 6.7

Parâmetro	Cloro	Propano
Direção do vazamento	horizontal	horizontal
Fração do Limite Inferior de Inflamabilidade (LII)	-	1
Concentração de interesse para dispersão (ppm)	100	20.000
Fluxo de radiação solar (kW/m ²)	1	1
Rugosidade da superfície (mm)	1.000	1.000
Temperatura do solo para cálculos de dispersão e poça durante o dia (°C)	Temperatura de armazenamento + 5 °C	Temperatura de armazenamento + 5 °C
Temperatura do solo para cálculos de dispersão e poça durante a noite (°C)	Temperatura de armazenamento	Temperatura de armazenamento

Das 24 estações disponíveis no DATAGEO, inicialmente escolheu-se as estações Araçatuba, Jundiá, Marília, São José dos Campos e Tatuí. Como critério dessa escolha, buscou-se aquelas com categoria de estabilidade atmosférica e velocidade dos ventos que, individualmente ou em conjunto, mais se afastam das condições *default* (daqui em diante, por efeito de simplificação, denominadas *default*).

Para as cinco estações, realizou-se simulações obtendo-se contornos de concentrações máximas de cloro e de propano, mais detalhadas a seguir. Dessas estações, escolheu-se duas para o dia e duas para a noite com resultados que mais se afastam daqueles relativos ao *default*.

Os quadros 3 e 4 trazem os condições meteorológicas *default* e das estações escolhidas.

Quadro 3 – Condições meteorológicas para as simulações de cloro

		<i>Default</i>	Estação São José dos Campos	Estação Tatuí	<i>Default</i>	Estação Araçatuba	Estação São José dos Campos
		Período diurno			Período noturno		
Temperatura ambiente (°C)		25	23,9	23	20	22,7	19,8
Velocidade do vento (m/s)		3	1,6	3	2	2	1,4
Categoria de estabilidade		C	B	B	E	F	F
Umidade relativa do ar (%)		80	76	69	80	75	89
Direção do vento	De → Para						
	N → S	12,5	20	15,4	12,5	3,8	6
	NE → SW	12,5	28,6	14,3	12,5	9,1	18,1
	E → W	12,5	4,9	6,1	12,5	14,3	7,2
	SE → NW	12,5	11,8	12,4	12,5	30,4	23,9
	S → N	12,5	10,1	28,8	12,5	20,5	17
	SW → NE	12,5	10,6	12,5	12,5	10,1	15,6
	W → E	12,5	10,1	4,8	12,5	6,9	10,6
	NW → SE	12,5	3,9	5,7	12,5	4,9	1,6

Quadro 4 – Condições meteorológicas para as simulações de propano

		<i>Default</i>	Estação São José dos Campos	Estação Tatuí	<i>Default</i>	Estação Araçatuba	Estação Tatuí
		Período diurno			Período noturno		
Temperatura ambiente (°C)		25	23,9	23	20	22,7	18,6
Velocidade do vento (m/s)		3	1,6	3	2	2	2,7
Categoria de estabilidade		C	B	B	E	F	E
Umidade relativa do ar (%)		80	76	69	80	75	87
Direção do vento	De → Para						
	N → S	12,5	20	15,4	12,5	3,8	6
	NE → SW	12,5	28,6	14,3	12,5	9,1	7,7
	E → W	12,5	4,9	6,1	12,5	14,3	5,4
	SE → NW	12,5	11,8	12,4	12,5	30,4	8,5
	S → N	12,5	10,1	28,8	12,5	20,5	42,4
	SW → NE	12,5	10,6	12,5	12,5	10,1	19,8
	W → E	12,5	10,1	4,8	12,5	6,9	6,6
	NW → SE	12,5	3,9	5,7	12,5	4,9	3,6

O simulador oferece saídas (resultados) na forma de relatórios e na forma de gráficos. Optou-se pelos gráficos, de forma a facilitar a visualização das áreas de dano de hipóteses acidentais. Para a hipótese 1, foram utilizados os contornos das nuvens em 106ppm. Essa concentração foi escolhida por representar aproximadamente 1% de probabilidade de fatalidade humana em 10min de exposição, a 25°C [1]. Para a hipótese 2, foram utilizados os contornos das nuvens em 20.000ppm. Essa concentração foi escolhida por representar o LII.

4. RESULTADOS OBTIDOS

As figuras 1 e 2 mostram as curvas de dispersão do cloro para o dia e para a noite, respectivamente. A tabela 1 mostra as áreas delimitadas por cada curva.

Figura 1 Dispersão atmosférica de cloro durante o dia: contornos de máximas distâncias para a concentração de 106ppm a 25°C

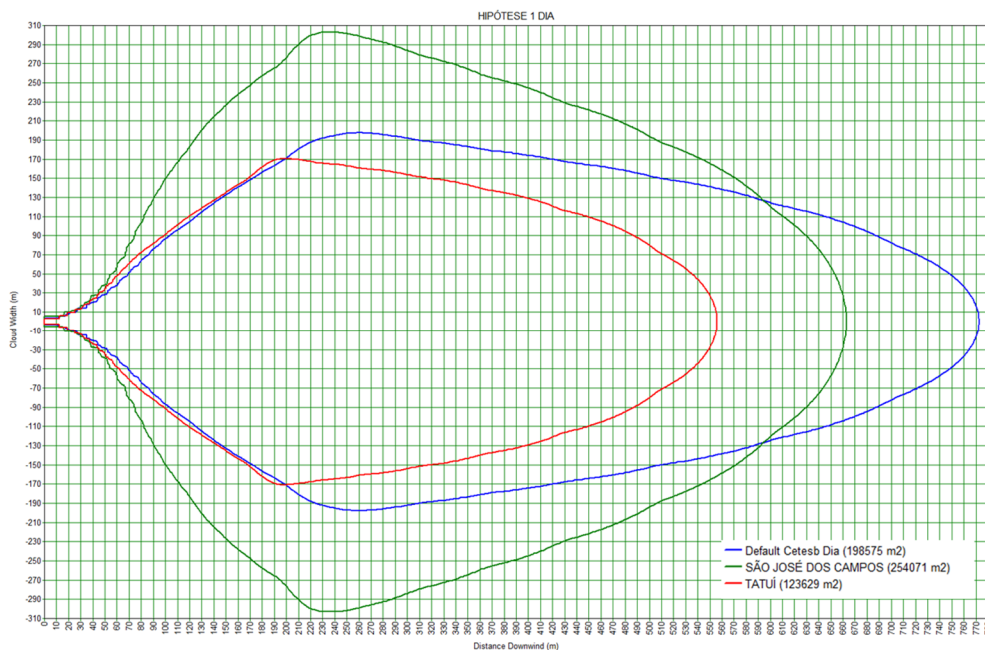


Figura 2 Dispersão atmosférica de cloro durante a noite: contornos de máximas distâncias para a concentração de 106ppm a 25°C

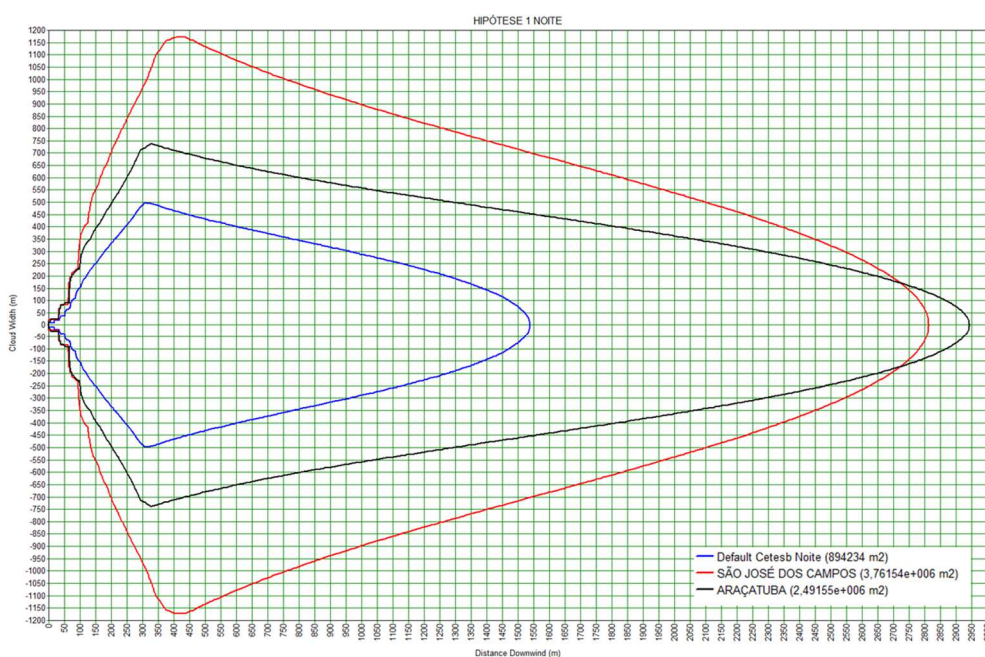


Tabela 1 Áreas delimitadas pelos contornos de máxima concentração de cloro

Período		Área (m ²)	Relação área estação / área default
Dia	<i>Default</i>	198.575	-
	Estação São José dos Campos	254.071	1,28
	Estação Tatuí	123.629	0,62
Noite	<i>Default</i>	894.234	-
	Estação Araçatuba	2.491.550	2,79
	Estação São José dos Campos	3.761.540	4,21

As figuras 3 e 4 mostram as curvas de dispersão do propano para o dia e para a noite, respectivamente. A tabela 2 mostra as áreas delimitadas por cada curva.

Figura 3 Dispersão atmosférica de propano durante o dia: contornos de máximas distâncias para a concentração de 20.000ppm a 25°C

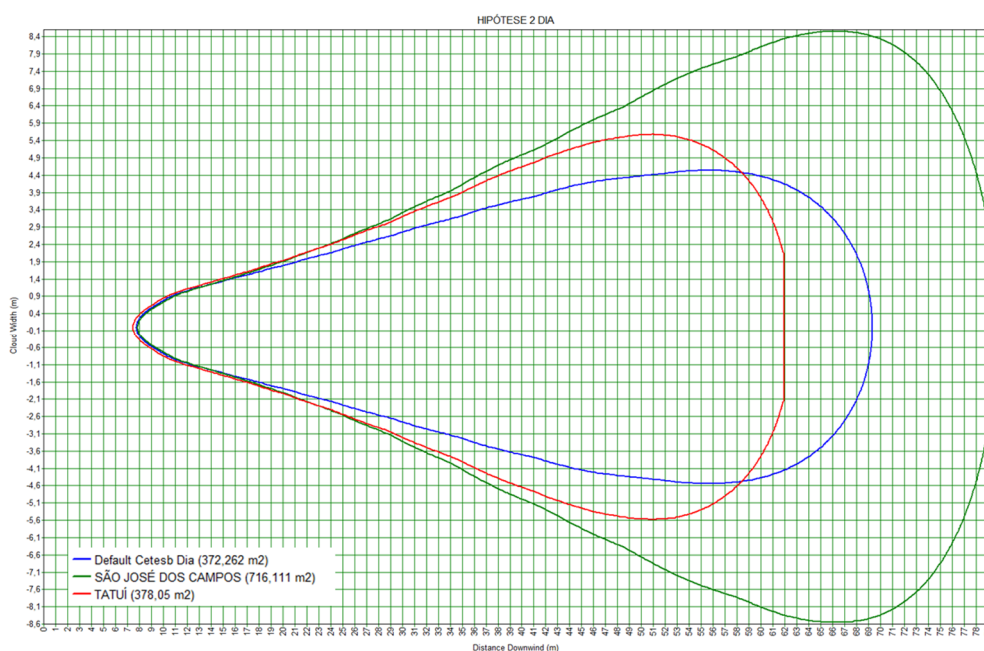


Figura 4 Dispersão atmosférica de propano durante a noite: contornos de máximas distâncias para a concentração de 20.000ppm a 25°C

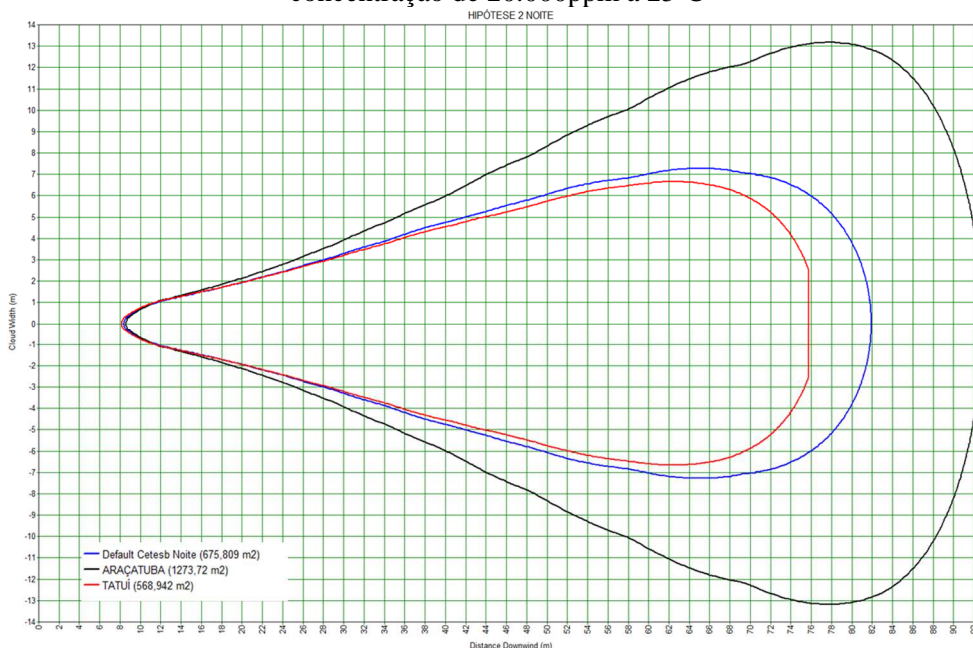


Tabela 2 Áreas delimitadas pelos contornos de máxima concentração de propano

Período		Área (m ²)	Relação área estação / área default
Dia	<i>Default</i>	372,3	-
	Estação São José dos Campos	716,1	1,92
	Estação Tatuí	378,0	1,01
Noite	<i>Default</i>	675,8	-
	Estação Araçatuba	1273,7	1,88
	Estação Tatuí	568,9	0,84

5. COMENTÁRIOS FINAIS

Há dois aspectos a se considerar a partir das figuras 1 e 2: a área da pluma e a distância alcançada pela mesma na direção do vento. O primeiro é necessário para a estimativa do risco de um empreendimento [1] onde as hipóteses 1 ou 2 se apliquem. O segundo, por vezes também utilizado para delimitar regiões (quadrantes) de interesse na estimativa do risco, é comumente empregado no estudo do alcance do efeito físico de interesse [4].

A figura 1, que apresenta os contornos de máxima distância alcançada pela nuvem cloro (106ppm a 25°C) durante o dia, mostra que o *default* (veja quadro 3) propicia o maior alcance da nuvem. Já as condições da estação São José dos Campos propiciam área 28% maior que a associada ao *default* (veja tabela 1). Neste caso, a velocidade do vento menor (1,6m/s) medida na estação sugere que durante o dia esse parâmetro é o que mais influencia a dispersão. A figura mostra o alargamento da nuvem, ou seja, o espalhamento lateral do cloro, embora com menor alcance. Quando se observam as condições da estação Tatuí – mesma velocidade do vento do *default* e categoria de estabilidade B – confirma-se o entendimento anterior sobre a influência do vento na dispersão diurna do cloro. Aqui, a área da nuvem é 62% daquela associada ao *default*, consistente com as diferentes categorias de estabilidade.

A figura 2, que apresenta os contornos da nuvem de cloro durante a noite, mostra que o *default* propicia a menor área da nuvem. A estação Araçatuba, com mesma velocidade que o *default* e categoria F, apresenta área 2,79 vezes maior. Quando a velocidade do vento é menor, como a observada para a estação São José dos Campos, os efeitos de maior estabilidade e menor velocidade de vento se sobrepõem, sendo observados pelo aumento da área ocupada pela nuvem, neste caso 4,21 vezes maior que para o *default*. Entre as duas estações, que apresentam mesma categoria de estabilidade, a velocidade de vento de 1,4m/s medida na estação São José dos Campos determina o espalhamento da nuvem nas proximidades do local do vazamento, com área 51% acima daquela da estação Araçatuba.

A figura 3, que apresenta os contornos de máxima distância alcançada pela nuvem de propano (20.000ppm a 25°C) durante o dia, mostra que a velocidade de vento de 1,6m/s medida na estação São José dos Campos (quadro 4) determina o espalhamento da nuvem. Como consequência, a área ocupada pela nuvem é 92% maior que a relativa ao *default* (tabela 2). Para a estação Tatuí, com mesma velocidade de vento e categoria B, o menor alcance da nuvem é compensado pelo maior espalhamento lateral, de forma que as áreas são similares. Entre as estações, que apresentam categoria de estabilidade B, as diferenças entre velocidades do vento refletem as áreas apresentadas na tabela 2.

A figura 4, que apresenta os contornos da nuvem de propano durante a noite, mostra a estação Araçatuba com mesma velocidade do vento em relação ao *default* e categoria de estabilidade F. Como consequência, a área ocupada pela nuvem é 88% maior que a relativa ao *default*. Já para a estação Tatuí, com mesma categoria de estabilidade e velocidade de vento de 2,7m/s, a nuvem ocupa 84% daquela relativa ao *default*.

O estudo mostrou a influência das condições meteorológicas na dispersão de cloro e propano em hipóteses típicas de um EAR aplicáveis ao armazenamento dessas substâncias. Evidenciou diferenças de mais de quatro vezes nas áreas estimadas a partir de medições locais de parâmetros meteorológicos em relação ao *default*. Em situações menos conservativas, mostrou ser possível alcançar áreas menores que a relativa ao *default*, como mostram as tabelas 1 e 2 para a estação Tatuí.

Essas diferenças influenciam a estimativa dos indicadores de risco – risco individual e risco social – e podem ser melhor exploradas em outra pesquisa. Adicionalmente, deve-se dar atenção às diferenças na distribuição do vento entre o *default*, que considerada valores iguais em todas as direções, e os valores medidos localmente. Os quadros 3 e 4 exemplificam essas diferenças, que também modificam os indicadores de risco.

6. REFERÊNCIAS

- [1] CETESB. *Norma P4.261: risco de acidente de origem tecnológica – método para decisão e termos de referência*. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. São Paulo, 2ª Edição (2014). Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/servicos/normas-tecnicas-cetesb>>. Acesso em: 22 set. 2015.
- [2] SMA. *Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo – IDEA-SP: base territorial ambiental unificada*. Secretaria do Meio Ambiente. São Paulo (2015). Disponível em: <<http://datageo.ambiente.sp.gov.br/app/?ctx=DATAGEO#>>. Acesso em: 24 set. 2015.
- [3] DNV. PHAST – Process Hazard Analysis Software Tools, version 6.7. *DNV Software*, London, 2012.
- [4] BUBBICO, R. & MAZZAROTTA, B., “Accidental Release of Toxic Chemicals: Influence of the Main Input Parameters on Consequence Calculation”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 151, p.394, 2008.