


**PMI-3328**  
**Introdução ao Meio Ambiente e**  
**Sustentabilidade na Mineração**

---

**Tema 2**  
**Polição do ar**

**Luis E. Sánchez**

**2023**



**Arraste eólico em mina de carvão**



**L. E. Sánchez**

PMI-3328 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

Foto: L. E. Sánchez

**Conteúdo**

1. Impactos da mineração na atmosfera
2. Principais poluentes do ar na mineração
3. Estimativa de emissões e previsões de dispersão
4. Medidas de controle
5. Medidas de controle da poluição
6. Monitoramento

**L. E. Sánchez**

PMI-3328 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

**Geração de poeira na perfuração**



**L. E. Sánchez**

PMI-3328 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

Foto: L. E. Sánchez

**Emissões de poeira no transporte de minério**



**L. E. Sánchez**

PMI-3328 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

Foto: L. E. Sánchez

**Deposição de poluentes de origem industrial**



**L. E. Sánchez**

PMI-3328 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

Foto: L. E. Sánchez

**Impactos da mineração na qualidade do ar**

☐ **Degradação da qualidade do ar por emissões de:**

- Poeiras fugitivas
- Gases de exaustão de motores a combustão interna e gases de detonação
- Compostos Orgânicos Voláteis de áreas de apoio
- Poluentes oriundos de processos industriais (secagem de minério, fundição etc.) ex.: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, fumos metálicos
- Gases de efeito estufa (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>)

Formados durante processos de combustão. O NO<sub>x</sub> sob a ação de luz solar se transforma em NO<sub>2</sub>, tem papel importante na formação de oxidantes fotoquímicos como o ozônio. O NO<sub>2</sub> apresenta riscos à saúde humana.

Gases e vapores resultantes da queima incompleta e respiração de combustíveis e de outros produtos orgânicos, emitidos por veículos, indústrias, processos de estocagem e transferência de combustíveis etc. Muitos desses compostos, participam ativamente das reações de formação do ozônio. Dentre os compostos orgânicos voláteis presentes nas atmosferas urbanas estão os compostos aromáticos monocíclicos, em particular: benzeno, tolueno, etil-benzeno e xileno. Os aromáticos monocíclicos são precursores do ozônio e alguns desses compostos podem causar efeitos adversos à saúde.

Fonte: Colexib

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

L. E. Sánchez

**Aerodispersóides na mineração**

☐ **Aerodispersóides (material particulado)**

- partículas sólidas ou líquidas de tamanho maior que uma molécula (cerca de 0,0005 µm para CO<sub>2</sub> ou SO<sub>2</sub>) até 500 µm (0,5 mm)
- são aerodispersóides:
  - (i) fumaça produzida por combustão, incluindo fumos metálicos (ex. fundição de metais) e fumaça de motores diesel
  - (ii) poeiras, definidas como partículas sólidas produzidas por ruptura mecânica de sólidos

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

L. E. Sánchez

**Impactos da mineração na qualidade do ar**

☐ **Degradação de solos, águas superficiais ou vegetação por deposição de particulados ou deposições ácidas**

☐ **Riscos à saúde humana por exposição a poluentes do ar**

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

L. E. Sánchez

**Tamanho de partícula X tempo de deposição**

Cuadro 1 - Tamanhos típicos de emisiones atmosféricas de partículas

Tipo de partículas	Faixas de diâmetros	Tiempo teórico para caer 1m
Polvos de carbón	100 a 1 µm	1,1 seg a 168 min
Polvos de cemento, fragmentación e minerales	100 a 0,1 µm	1,1 seg a 142 horas
Cenizas voladoras	100 a 0,1 µm	1,1 seg a 142 horas
Humos de combustión de aceites	1 a 0,1 µm	168 min a 142 horas
Núcleos de combustión	0,1 a 0,01 µm	142 horas a 99 días
Polvos y humos metálicos	100 a 0,001 µm	1,1 seg a 3 años

Fonte: Ripley et al. (1978)

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

L. E. Sánchez

**Tipos de poluentes do ar na mineração**

☐ **Gases**

☐ **Aerodispersóides (material particulado)**

► importante na mineração: material particulado pode causar:

- ◆ Efeitos sobre a saúde humana
- ◆ Efeitos sobre os materiais, ex. corrosão
- ◆ Efeitos sobre a vegetação: deposição sobre a superfície foliar

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

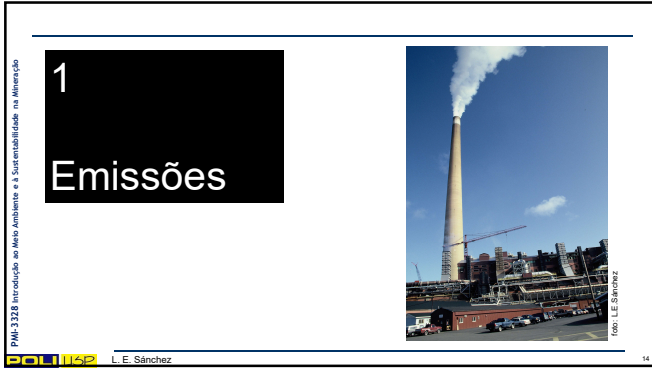
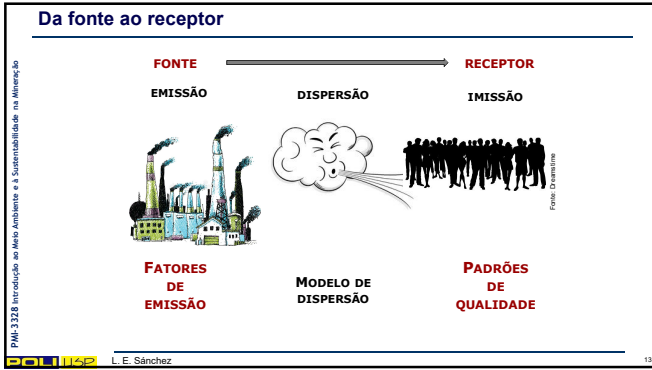
L. E. Sánchez

**Classificação quanto ao tamanho**

Terminologia em português	Terminologia em inglês	Definição
Partículas totais em suspensão PTS	Total particulate matter TPM	Ø < 100 µm
Partículas inaláveis MP <sub>10</sub>	PM 10	Ø < 10 µm
Partículas inaláveis finas MP <sub>2,5</sub>	PM 2.5	Ø < 2,5 µm
Fumaça	fumes	

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

L. E. Sánchez



### Exemplo: emissões de vias não pavimentadas

**fator de emissão para vias não pavimentadas:**

$$E = K \cdot 1,7 \cdot \left(\frac{s}{12}\right) \cdot \left(\frac{S}{48}\right) \cdot \left(\frac{W}{2,7}\right)^{0,7} \cdot \left(\frac{w}{4}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{365-p}{365}\right)$$

**E** = emissão (kg / km)  
**K** = multiplicador de tamanho de partícula (adimensional)  
**s** = teor de silte ( $\Phi < 75 \mu\text{m}$ ) do material da superfície da pista (%)  
**S** = velocidade média do veículo (km/h)  
**W** = peso médio do veículo (t)  
**w** = número médio de pneus  
**p** = número de dias ao ano com precipitação pluviométrica  $> 0,254 \text{ mm}$

o multiplicador de tamanho aerodinâmico é dado pela seguinte tabela:

$\Phi < 2,5 \mu\text{m}$	$2,5 < \Phi < 5 \mu\text{m}$	$5 < \Phi < 10 \mu\text{m}$	$10 < \Phi < 15 \mu\text{m}$	$15 < \Phi < 30 \mu\text{m}$
0,095	0,20	0,36	0,50	0,80

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração  
L. E. Sánchez

### Emissões de poluentes atmosféricos

► Um fator de emissão é a média estatística da massa de poluentes emitida por uma determinada fonte de poluição por quantidade de material manuseado ou processado, expressa usualmente em g/t, ou seja, massa de poluente por massa de material manuseado ou produzido

$$E = A \times EF \times (1 - ER/100)$$

**EMIÇÃO** = **TAXA DE ATIVIDADE** × **FATOR DE EMISSÃO** × **EFICIÊNCIA DE REDUÇÃO**

COMPILATION OF AIR POLLUTANT EMISSION FACTORS  
VOLUME I: STATIONARY POINT AND AREA SOURCES

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração  
L. E. Sánchez



### Emissões de pilhas de minério (brita)

fator de emissão para descarga contínua:

$$E = K \cdot 0,0009 \left( \frac{s}{5} \cdot \frac{U}{2,2} \cdot \frac{H}{3} \right)^2 \left( \frac{M}{2} \right)^2$$

**E = emissão (kg/h)**  
**K = multiplicador de tamanho de partícula (adimensional)**  
**s = teor de silte ( $\phi < 75 \mu\text{m}$ ) do material da superfície da pista (%)**  
**U = velocidade média do vento (km/h)**  
**H = altura de descarga (m)**  
**M = teor de umidade do material (%)**

o multiplicador de tamanho aerodinâmico é dado pela seguinte tabela:

$\phi < 2,5 \mu\text{m}$	$2,5 < \phi < 5 \mu\text{m}$	$5 < \phi < 10 \mu\text{m}$	$10 < \phi < 15 \mu\text{m}$	$15 < \phi < 30 \mu\text{m}$
0,13	0,23	0,36	0,48	0,73

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração | L. E. Sánchez | 19

### Previsão da qualidade do ar: modelos

**Modelos de dispersão**

Simulam a concentração de determinado poluente a partir de taxas ou fatores de emissão em função das condições meteorológicas

Taxas de emissão → Condições de dispersão → Modelo → Concentração

**Modelo gaussiano clássico**

fonte: Wikipedia

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração | L. E. Sánchez | 20

### Emissões de atividades de britagem de agregados

Atividade	PTS	Confi- ança	MP <sub>10</sub>	confia- nça	MP <sub>2,5</sub>	Confi- ança
Britagem terciária	0,0027	E	0,0012	C	n.d.	
Britagem terciária (controlada)	0,0006	E	0,00027	C	n.d.	
Peneiramento	0,0125	E	0,0043	C		
Peneiramento (controlado)	0,0011	E	0,00037	C	0,000025	E
Transferência de correias	0,0015	E	0,00055	D	n.d.	

Emissões em kg/Mg

Fonte: USEPA, Crushed Stone Processing and Pulverized Mineral Processing. AP 42, Fifth Edition, Volume I Chapter 11: Mineral Products Industry 2004.

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração | L. E. Sánchez | 20

### Equações de dispersão a partir de uma chaminé

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi \bar{u} \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2} \right]$$

**c(x,y,z) = concentração nos pontos de coordenadas (x,y,z)**  
**Q = taxa constante de emissão (g/s)**  
 **$\sigma_y$  = coeficiente de dispersão horizontal (m)**  
 **$\sigma_z$  = coeficiente de dispersão vertical (m)**  
**U = velocidade constante do vento (m/s)**  
**h = altura efetiva da chaminé (m)**

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração | L. E. Sánchez | 20

# 2

## Dispersão

foto: L. E. Sánchez

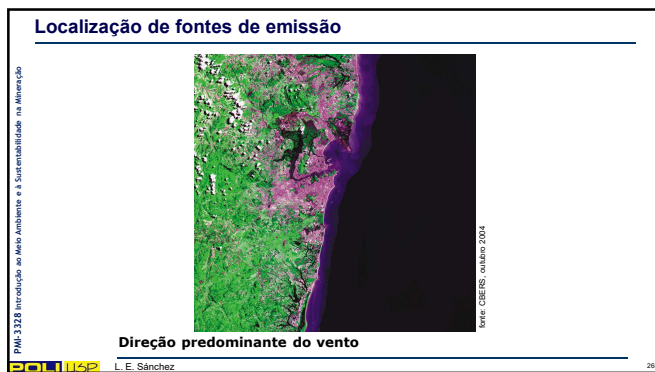
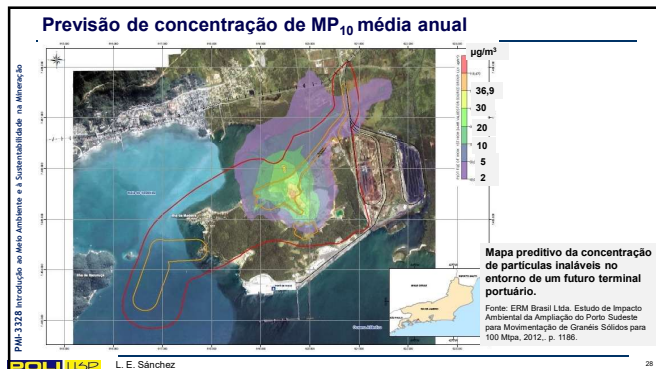
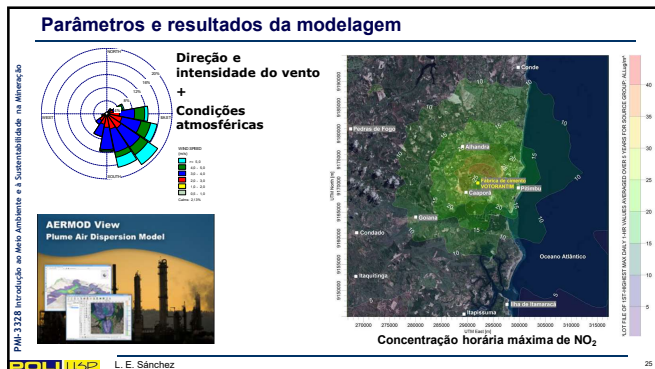
PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração | L. E. Sánchez | 21

### Parâmetros para modelagem em fábrica de cimento

#### Emissões nas fontes

Chaminé	Unidade	Forno	Moagem de coque	Moagem Z1	Moagem Z2	Ensaia-doras
UTM-E	m	291957	291.898	292.030	292.030	291.957
UTM-N	m	9170574	9.170.609	9.170.454	9.170.398	9.170.574
Altura	m	142	40	30	30	30
Diâmetro	m	4,5	1,5	2	2	1
Temperatura	°C	103	90	50	50	30
Vazão	m³/h	1.300.000	105.000	190.000	190.000	30.000
Vazão	Nm³/h (bs)	737.000	63.589	129.316	129.316	23.459
Teor de Oxigênio	%vol.	13,67	---	---	---	---
Material particulado (MP)	mg/Nm³	25 (11% O <sub>2</sub> )	25	25	25	25
Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> )	mg/Nm³	556 (11% O <sub>2</sub> )	---	---	---	---
Oxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> )	mg/Nm³	650 (10% O <sub>2</sub> )	---	---	---	---
Monóxido de carbono (CO)	mg/Nm³	125 (7% O <sub>2</sub> )	---	---	---	---

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração | L. E. Sánchez | 24



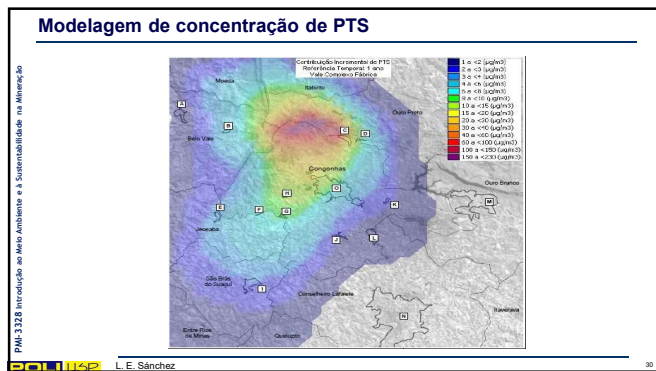
### Previsões para um conjunto de minas

Local	Partículas totais ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		Partículas inaláveis $\text{PM}_{10}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	
	Máxima de 24 h	Média Anual	Máxima de 24 h	Média Anual
<b>C</b> Pires	213,3	81,3	108,5	40,0
<b>H</b> Plataforma	196,1	68,8	101,7	31,8
<b>M</b> Ouro Branco	69,5	38,1	38,8	14,6
<b>O</b> Congonhas - Setor 1	202,4	68,3	107,0	32,3
<b>O</b> Congonhas - Setor 6	158,2	58,9	80,9	26,9
<b>Padrão de Qualidade do Ar (Conama)</b>	240	80 <sup>a</sup>	<b>150</b>	<b>50</b>
<b>Diretrizes OMS</b>	-	-	<b>50</b>	<b>20</b>

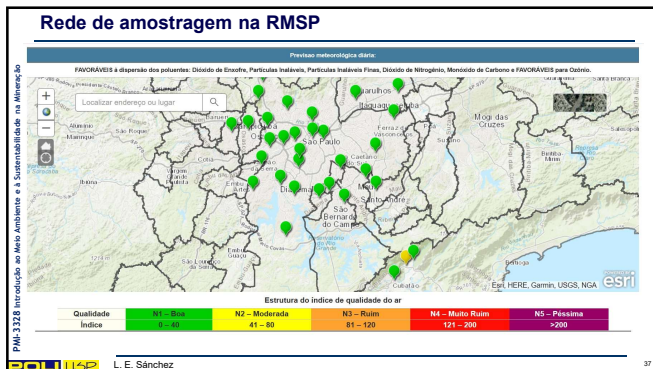
fonte: Neri et al. (2015)

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

L. E. Sánchez





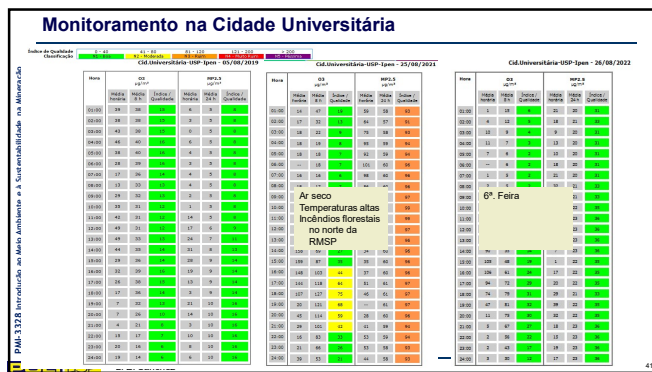
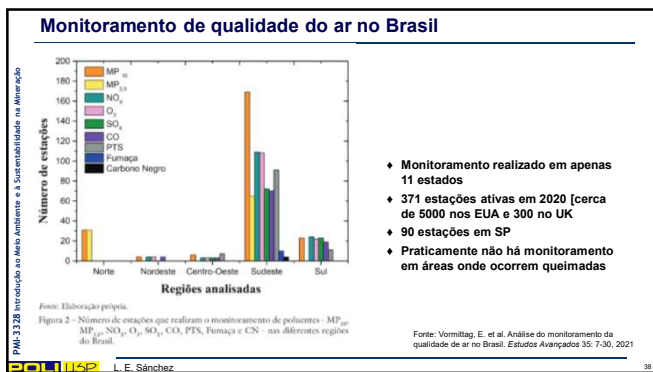


### Razões apresentadas pela OMS

Nível	Razões
Meta intermediária 1 (MI1)	Níveis associados a risco de longo prazo de mortalidade cerca de 15% maior que o do nível DQA (Diretriz de Qualidade do Ar)
Meta intermediária 2 (MI2)	Além de outros benefícios à saúde, estes níveis reduzem o risco de mortalidade prematura em cerca de 6% (2-11%) em relação ao nível MI1
Meta intermediária 3 (MI3)	Além de outros benefícios à saúde, estes níveis reduzem o risco de mortalidade prematura em cerca de 6% (2-11%) em relação ao nível MI2
Diretrizes de qualidade do ar (DQA)	Os níveis a partir do quais a mortalidade total, cardiopulmonar e por câncer de pulmão aumenta com mais de 95% de confiança em resposta à exposição de longo prazo a PM 2,5

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

L. E. Sánchez



### Padrões e diretrizes

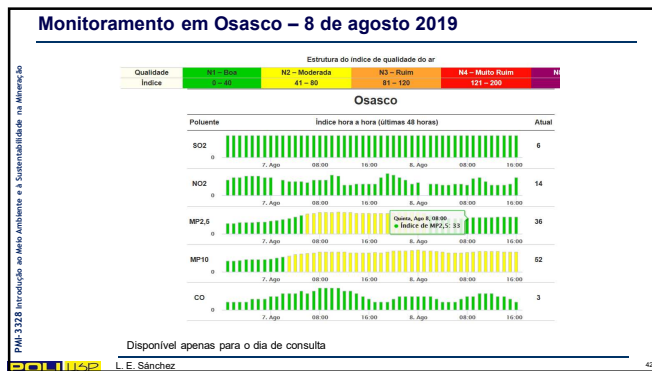
Parâmetro	Diretrizes OMS			Meta	Padrão legal nacional	Padrão legal estadual SP
	Meta intermediária 1	Meta intermediária 2	Meta intermediária 3			
PM-10 (µg/m <sup>3</sup> ) média 24 h	150	100	75	50	120	100
PM-2.5 (µg/m <sup>3</sup> ) média 24 h	75	50	37,5	25	40	50
PM-10 (µg/m <sup>3</sup> ) média anual	70	50	30	20	60	35
PM-2.5 (µg/m <sup>3</sup> ) média anual	35	25	15	10	20	17

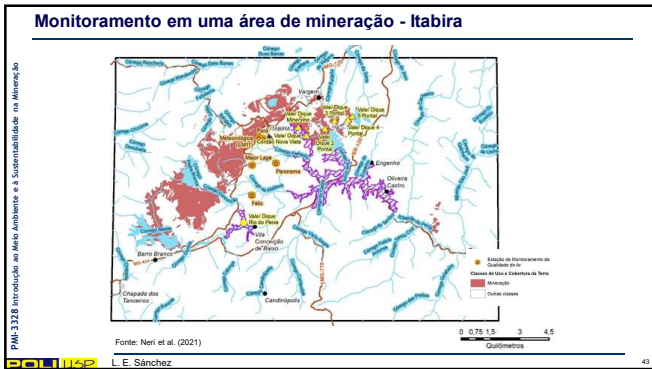
**Nota: o uso da diretriz PM-2,5 é preferível para proteção da saúde**

fonte: WHO. WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, Global update 2005. Summary of risk assessment. Geneva: WHO, 2006.

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

L. E. Sánchez





### Algumas técnicas de controle de emissões na mineração

Controle de emissões = redução na fonte

Fonte de emissão	Principais técnicas de controle
perfurção	- coleta de poeiras na perfuratriz (VLE + ciclone ou filtro de mangas)
detonação	- umidificação da frente de desmonte - detonação em condições favoráveis de dispersão
carregamento	- umidificação da pilha de minério
transporte interno de minério e estéril	- umidificação das vias de circulação (caminhão pipa, aspersores) - asfaltamento de vias de grande circulação
britagem e classificação	- aspersão de água na câmara de alimentação - captação com VLE + filtro de mangas
Armazenamento em pilhas	- aspersão de água

L. E. Sánchez

### Monitoramento em uma área de mineração - Itabira

Medições	Estação	Ano	Partículas respiráveis (MP10)				Partículas totais em suspensão (PTSP)				
			Média de 24 horas		Média anual	Média de 24 horas		Média anual			
			PI-1 = 120 µg/m³	PF = 50 µg/m³	PI-1 = 40 µg/m³	PF = 240 µg/m³	PI-1 = 80 µg/m³				
			Últimos dias amostrados	Dias que excede (%)	Estações do ano	Dias que excede (%)	Estações do ano	Média anual	Dias que excede (%)	Estações do ano	Média anual
Pará	2017	252	84%	Todas	98%	Todas	208.09	202	79%	Todas	344
	2018	162	13%	V - P - I	80%	V - P - I	78.32	162	18%	V - P - I	145.44
	2019	259	85%	Todas	121%	Todas	180.95	358	83%	Todas	274.31
Major Lage	2017	350	0%		1%	I	19.44	350	0%	Todas	23.4
	2018	360	83%	Todas	99%	Todas	201.39	362	62%	Todas	261
	2019	354	91%	Todas	99%	Todas	237.13	354	78%	Todas	344.9
Félix	2017	201	76%	Todas	80%	Todas	118.48	201	61%	Todas	235.25
	2018	361	76%	Todas	76%	Todas	321	361	67%	Todas	247.37
	2019	299	93%	Todas	99%	Todas	230.96	366	75%	Todas	312.81
Panozama	2017	331	66%	Todas	93%	Todas	165.59	327	44%	Todas	200.08
	2018	363	72%	Todas	98%	Todas	170.02	362	42%	Todas	190.71
	2019	365	74%	Todas	100%	Todas	201.88	365	74%	Todas	222.23

Legenda da coluna Estações do ano: V - verão D - outono I - inverno P - primavera Todas - todas as estações  
PI-1 Padrão Intermediário I PF Padrão final

Fonte: Dados fornecidos pela FEAM

L. E. Sánchez

### Algumas técnicas de controle de emissões na mineração

Fonte de emissão	Principais técnicas de controle
estocagem em pilhas	- redução da altura de queda - condutos telescópicos - aspersão de água - aspersão de solução de amido
secagem	- VLE + ciclone ou filtro eletrostático ou lavador de gases
transporte externo de minério	- cobertura da carga - aspersão de substância aglomerante

L. E. Sánchez

# 4 Controle

L. E. Sánchez





**Abatimento de emissões**



PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e à Sustentabilidade na Mineração

Aspersão de água em via interna de transporte

Fonte: L.E. Sánchez

POLI USP L. E. Sánchez 49

**5**

**Monitorma-  
mento**

Estação de amostragem de Barra Longa

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e à Sustentabilidade na Mineração

POLI USP L. E. Sánchez 53

**Abatimento de emissões**



Dust Fighter DF 50000

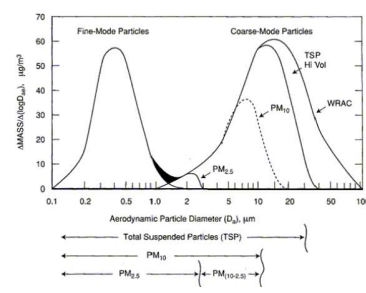
Equipamentos para supressão de poeira

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e à Sustentabilidade na Mineração

Fonte: <http://www.koverlight.com/d50000.php>  
<http://www.marlin-eng.com/ir/products/air-management-solutions/suppression.html>

POLI USP L. E. Sánchez 50

**Indicadores e monitoramento**



AMASS<sub>log(D<sub>a</sub>)</sub> (µg/m<sup>3</sup>)

Aerodynamic Particle Diameter (D<sub>a</sub>) (µm)

Fine-Mode Particles

Coarse-Mode Particles

TSP HI Vol

WRAC

PM<sub>10</sub>

PM<sub>2.5</sub>

PM<sub>10-2.5</sub>

Total Suspended Particles (TSP)

PM<sub>10</sub>

PM<sub>2.5</sub>

PM<sub>10-2.5</sub>

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e à Sustentabilidade na Mineração

POLI USP L. E. Sánchez 53

**Abatimento de emissões**



Canhão aspersor em pátio de estocagem de minério

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e à Sustentabilidade na Mineração

Fonte: L.E. Sánchez

POLI USP L. E. Sánchez 51

**Amostrador de grande volume**



PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e à Sustentabilidade na Mineração

Fonte: Pannier Propriet, Ltd.

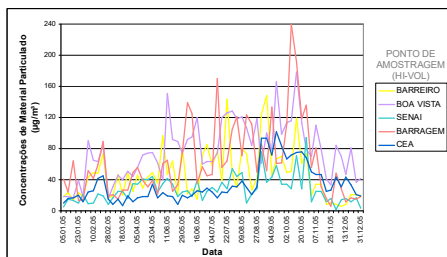
POLI USP L. E. Sánchez 54

### Amostrador de PM-10



PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

### Série temporal de concentração de PTS



PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração

Fonte: Programa ProQual, L30h

### Objetivos de aprendizagem

- ❑ Conhecer os principais poluentes do ar na mineração
- ❑ Compreender a relação básica emissão-dispersão-recepção
- ❑ Conhecer os principais tipos de ferramentas de gestão da qualidade do ar: fatores de emissão, modelos de dispersão, padrões de qualidade
- ❑ Conhecer algumas técnicas de controle da poluição do ar

PMI-3228 Introdução ao Meio Ambiente e a Sustentabilidade na Mineração