



# A7<sup>th</sup> Academic

INTERNATIONAL WORKSHOP  
ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION

“CLEANER PRODUCTION FOR ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS”

## Pegada Química do Brasil: Estudo de Caso de Dioxinas e Furanos

SIMOES, P. H. B. <sup>a,b\*</sup>, GIANNETTI, B. F. <sup>a</sup>

a. Universidade Paulista, São Paulo

b. Lisam Ecoadvisor Systems, São Paulo

\*Corresponding author, simoes.pedro@hotmail.com

### Resumo

As Dioxinas e Furanos fazem parte dos chamados Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) com alto potencial de causar impactos danosos ao ser humano e ao meio ambiente. Considerando que a qualidade de vida do ser humano é afetada negativamente pela presença dessas substâncias esse trabalho calcula os danos potenciais à saúde humana com base no modelo de avaliação de risco USEtox e no inventário Brasileiro de Dioxinas e Furanos. Os potenciais danos à saúde são indicados pela pegada química dos estados brasileiros a qual é associada às características geográficas e demográficas de cada unidade da federação. O *score* de impacto total calculado para o Brasil é de 621 DALY, o estado de São Paulo (SP) é o primeiro do *ranking* com 27% do impacto calculado, seguido por Minas Gerais com 16%, Rio de Janeiro com 12%, Espírito Santo com 10%, Pará com 7%, Paraná com 4%, Rio Grande do Sul e Mato Grosso com 3% cada. Estes oito estados concentram 80% dos impactos causados pelas emissões de Dioxinas e Furanos. O *score* de impacto representa um indicativo dos potenciais impactos a saúde humana e é uma referência alternativa para ordenar as categorias de fonte de emissão e pode auxiliar na tomada de decisão para políticas públicas. Os *scores* de impacto em razão da população  $IS_{pcapita}^{UF}$  do Produto Interno Bruto  $IS_{\$}^{UF}$  e da área,  $IS_{km^2}^{UF}$  mostram uma variação significativa quando comparados o ranqueamento de cada indicador, e é possível utilizá-los de forma conjunta ou individual para comparar a pegada química dos estados.

**Palavras-chave:** AICV, Pegada Química, Dioxinas e Furanos, USEtox.

### 1. Introdução

As Dioxinas e os Furanos fazem parte dos chamados Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) que apresentam alto tempo de permanência no ambiente, baixa taxa de degradação e alto potencial de causar impactos danosos ao ser humano e ao meio ambiente (MMA, 2013). O aumento da incidência de câncer, de efeitos sobre a reprodução e outros efeitos crônicos são exemplos de consequências adversas da exposição a essas substâncias, por isso carecem de ações para reduzir a exposição dos trabalhadores e populações vulneráveis, prevenindo a contaminação do solo, da água e do ar (MMA, 2015). Atualmente a emissão de no meio ambiente ocorre em sua maioria de forma não intencional em processos de síntese industrial e processos de queima ao ar livre, inclusive incêndios naturais (Jones e de Voogt, 1999; MMA, 2013).

As emissões de substâncias químicas no meio ambiente e a exposição da população a estes poluentes levam à ocorrência de doenças e mortes prematuras. Desta forma surgem questões como: É possível quantificar de forma simplificada os danos potenciais à população devido a exposição às substâncias

“CLEANER PRODUCTION FOR ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS”

Barranquilla - Colombia - June 21<sup>st</sup> and 22<sup>nd</sup> - 2018

químicas, a denominada Pegada Química? Estes indicadores podem servir de base para comparação entre organizações, estados e países, além de serem utilizados para embasar a tomada de decisão em políticas públicas na área de saúde e meio ambiente?

O DALY (Disability Adjusted Life Year) representa os anos de vida perdidos ajustados por incapacidade e morte prematura. Este indicador foi proposto por Murray e Lopez, (1996) e é atualmente a métrica utilizada pela Organização Mundial da Saúde para medir a carga de doenças em estudos sobre o estado da saúde de populações humanas. Segundo Gao et al. (2015), o DALY é vantajoso para quantificação e comparação dos riscos decorrentes da poluição ambiental, o valor de referência (*endpoint*) não é apenas a probabilidade de ocorrência da doença, mas um resultado para facilitar a avaliação da morbidade e mortalidade.

O impacto potencial causado à saúde humana e ao meio ambiente por uma substância química depende das propriedades físicas e químicas desta, da quantidade que entra no ambiente e da sua distribuição entre diferentes compartimentos ambientais (Hester e Harrison, 2006). As metodologias de contabilidade ambiental denominadas "pegadas" são importantes ferramentas para mensurar o impacto das atividades humanas na biosfera. A partir da pegada ecológica, desenvolvida por Wackernagel and Rees (1996), várias outras pegadas foram desenvolvidas, por exemplo, pegada de carbono e pegada da água. Neste contexto a pegada química (ChF) contabiliza os impactos relacionadas à produção e uso de produtos químicos e segundo Sörme et al. (2016), representa os impactos potenciais de substâncias químicas perigosas de produtos, organizações ou nações.

A avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV) vem sendo utilizada por diversos autores como ferramenta principal para calcular a pegada química (ChF), tanto de nações como de estados. A AICV é uma ferramenta que permite quantificar impactos ambientais relevantes, a partir da emissão de poluentes, em uma perspectiva de ciclo de vida. As quantidades emitidas de poluentes são transformadas em indicadores de impacto (*Score* de Impacto) usando fatores de caracterização (CFs) específicos da substância química (Hauschild, 2005).

Bjørn et al., (2014) utilizou a ChF para expressar os impactos ecotoxicológicos em água doce de emissões antrópicas de 173 substâncias químicas, a partir do inventário de emissões europeu de 2004. Sörme et al. (2016), calculou os impactos potenciais de toxicidade humana e ecotoxicológica de 54 substâncias químicas como primeiros passos para a ChF da Suécia.

Não há um consenso sobre a definição do termo ChF, porém especialistas concordam que a pegada química descreve os impactos (potenciais) de substâncias químicas perigosas, provenientes de produtos, organizações ou nações (Bjørn et al., 2014; Sala and Goralczyk, 2013 e Zijp et al., 2014). Segundo Panko e Hitchcock (2011), a ChF é um indicador do risco potencial causado por um produto baseando-se em sua composição química, nos perigos toxicológicos e ecotoxicológicos dos ingredientes, e na exposição potencial durante o ciclo de vida do produto.

Zijp et al. (2014), sugerem que a pegada química poderia ser convertida em um índice de poluição, a partir da divisão do volume disponível para diluição. Assim o índice >1 indicaria uma superação da capacidade de carga do ambiente. Para isto a medida de poluição e a medida de capacidade de carga devem ser mensuradas em uma mesma unidade de medida.

De forma similar a metodologia apresentada por Sala e Goralczyk (2013), este artigo considerou uma combinação da abordagem de ciclo de vida com a avaliação de risco. A ChF, neste artigo, é considerada como o dano potencial da emissão de poluentes, dos perigos toxicológicos das substâncias químicas considerando a exposição padrão de uma população, não leva em conta os perigos ecotoxicológicos e não utilizada como um indicador de sustentabilidade, já que o conceito de capacidade de carga do ambiente não foi estabelecido.

O objetivo desta pesquisa é calcular indicadores de impactos à saúde humana das emissões de Dioxinas e Furanos no Brasil como primeiros passos para o desenvolvimento da pegada química dos estados brasileiros.

## 2. Método

### 2.1. Cálculo da Pegada Química

Para o cálculo da pegada química as seguintes etapas foram consideradas: (1) Definição das fronteiras do sistema e massas das substâncias liberadas em cada compartimento ambiental (ar, água e solo); (2) Avaliação do impacto ambiental através da aplicação de modelo para avaliação do Fator de Destino (FF) e Fator de Efeito Toxicológico (*Toxicological Endpoints*) para cálculo do fator de caracterização (CF).

### 2.2. Emissões de Dioxinas e Furanos no Brasil

Os dados sobre a quantidade total de emissões para o ar, água e solo foram extraídos do Inventário Brasileiro de fontes e estimativa de emissões de Dioxinas e Furanos de 2013 (MMA, 2013), o qual foi elaborado de acordo com as diretrizes da 2<sup>a</sup> versão do *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases* (UNEP, 2005).

As unidades de medida das estimativas do inventário são apresentadas em gTEQ (gramas de toxicidade equivalente). Segundo Jones and de Voogt, (1999), as Dioxinas e Furanos ocorrem em misturas de 17 tipos de moléculas congêneres que agem coletivamente sendo seus potenciais efeitos toxicológicos mensurados a partir da soma da toxicidade equivalente ( $\Sigma$ TEQ) em relação a congênere mais tóxica denominada 2,3,7,8-TetraCDD. Para os cálculos de avaliação de risco, as liberações em resíduos foram consideradas como emissões para o solo e as quantidades presentes em produtos não foram consideradas nos cálculos, pois não são efetivamente emissões.

### 2.3. Avaliação de Toxicidade Humana

A avaliação dos impactos potenciais à saúde humana teve como base o modelo desenvolvido para avaliação de impactos de ciclo de vida, o USEtox, utilizado para avaliar os impactos toxicológicos das emissões de D liberadas em diferentes compartimentos ambiente. Este modelo disponibiliza uma base de dados com fatores de caracterização (CFs) para toxicidade humana e ecotoxicidade baseados em fatores ambientais, exposição e efeitos toxicológicos e ecotoxicológicos para mais de 3000 substâncias (Fantke et al., 2012). Foi desenvolvido em 2005 a partir de uma iniciativa da *United Nations Environmental Program* (UNEP) e *Society for Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC). É considerado por especialistas atualmente como o melhor modelo para a avaliação de impactos toxicológicos (Hauschild et al., 2013 e Rosenbaum et al., 2008).

O cálculo do CF, inclui o fator de destino (FF), o fator de exposição (XF) e um fator de efeito (EF). Os fatores de destino e exposição são combinados de modo a compor a fração em massa de uma substância emitida que é consumida (iF) pela população, por ingestão ou inalação. O XF avalia as rotas de exposição por inalação e ingestão e o EF é o indicador *Midpoint* e reflete a alteração na probabilidade de ocorrência de doenças durante o tempo de vida devida a exposição a uma substância química (CDU<sub>h</sub>=casos/kg).

A partir do EF, obtém-se o Fator de Dano (Damage Factor) toxicológico que é um CF *Endpoint* expresso em unidades comparativas de dano (CDU<sub>h</sub>=DALY/kg), interpretado como a ocorrência de danos à saúde devido a ocorrência de doenças causadas pela introdução/exposição da substância. A severidade média para efeitos a saúde de doenças não cancerígenas DALY<sub>noncancer,average</sub> = 2,7 e para doenças cancerígenas DALY<sub>cancer,average</sub> = 11,5 (Huijbregts et al., 2005).

### 2.4. Cálculo do Score de Impacto

O *score* de impacto toxicológico é calculado como a soma do CF de cada compartimento ambiental (ar, água e solo) multiplicado pela massa da substância (Fantke et al., 2017), conforme Eq.1.

$$IS = \sum_i \sum_x CF_{x,i} \times m_{x,i} \quad (1)$$

onde: *IS* é o *score* de impacto para toxicidade humana (DALY);  $CF_{x,i}$  é o fator de caracterização

*Endpoint* para toxicidade humana, da substância  $x$  emitida para o ambiente  $i$ , apresentado em (DALY/kg<sub>emitido</sub>) e  $m_{x,i}$  é a massa da substância  $x$  emitida para o ambiente  $i$ .

As massas das emissões para os compartimentos ambientais ar, água e solo, foram consideradas como emissões para ar continental, água doce continental e solo natural continental, respectivamente. Para os cálculos foram utilizados os CFs *Endpoint* modelados na região padrão do USEtox na versão 2.02 e as informações da substância 2,3,7,8-TetraCDD foram obtidas na base de dados de substâncias orgânicas do USEtox versão 2.0.

Para a quantificação dos danos por UF, o  $CF_{x,i}$  (DALY/kg<sub>emitido</sub>) é multiplicado pela massa total liberadas em cada UF para cada compartimento ambiental durante o ano de 2008,  $m_{i,x}^{UF}$  (kg<sub>emitido-2008</sub>), chegando-se ao score de impacto por UF por ano  $IS_{total}^{UF}$  (DALY), conforme apresentado na Eq.2.

$$IS_{total}^{UF} = CF_{i,x} \times m_{i,x}^{UF} \quad (2)$$

Para viabilizar a comparação entre as UFs, assume-se que os danos causados pelas emissões se distribuem uniformemente entre a população de cada UF, sem levar em consideração a distância entre a população e as fontes de emissão e as características específicas de cada grupo populacional. Sendo assim o *score* de impacto  $IS_{total}^{UF}$  (DALY) é combinado com a população (IBGE,2007) de cada UF para obter o  $IS_{pcapita}^{UF}$  (DALY/hab), conforme apresentado pela Eq.3.

$$IS_{pcapita}^{UF} = \frac{IS_{total}^{UF}}{n^{\circ}habitantes\ UF} \quad (3)$$

Em relação a produção de riqueza econômica dos estados, foi utilizado o Produto Interno Bruto (GDP) em dólares (IBGE,2007), para calcular o score de impacto relativo ao GDP de cada UF, o  $IS_{\$}^{UF}$  (DALY/U\$), foi calculado pela multiplicação do  $IS_{total}^{UF}$  (DALY) com o  $GDP_{UF}$  (U\$) conforme apresentado pela Eq.4.

$$IS_{\$}^{UF} = \frac{IS_{total}^{UF}}{GDP_{UF}} \quad (4)$$

As emissões ocorrem majoritariamente para o ar e sua dispersão depende de diversas características do ambiente e da substância o que demandaria uma avaliação mais específica e precisa de cada região e fonte de emissão. As propriedades físico químicas da substância foram consideradas no cálculo de avaliação de risco feito pelo USEtox, porém o cálculo do CF não considera as variáveis geográficas de cada UF, principalmente o volume de ar disponível para diluição, sendo assim assumimos que as emissões se dispersam totalmente e mantem dentro dos limites geográficos de cada UF para combinar o *score* de impacto  $IS_{total}^{UF}$  (DALY) com a área de cada UF, para obter o *score* de impacto proporcional a área  $IS_{km^2}^{UF}$  conforme apresentado na Eq.5.

$$IS_{km^2}^{UF} = \frac{IS_{total}^{UF}}{\text{Área UF}} \quad (5)$$

### 3. Resultados e Discussões

#### 3.1. Categorias de Fonte de Emissão

Dioxinas e Furanos provém principalmente de processos de combustão e, portanto, a, maioria das emissões (64,3%) são para ar, 34,4% das emissões para o solo e somente 1,3% para a água. O fator de caracterização utilizado para cálculo do *score* de impacto das emissões para o ar foi de 401,61 DALY/kg<sub>emitido</sub>, 179,25 DALY/kg<sub>emitido</sub> para emissões para o solo e (1673,43 DALY/kg<sub>emitido</sub> para emissões para a água.

As emissões em massa (g/TEQ) e o score de impacto calculado (DALY), apresentados na Tabela 1, tem valores proporcionais, visto que envolvem somente um grupo de substâncias e, portanto, os fatores de caracterização utilizados são semelhantes variando somente de acordo com o compartimento

ambiental que recebe a emissão ar, solo e água, neste caso com maior peso para emissões para água.

Em relação a origem, dentre as 9 Categorias, a principal contribuição para o score de impacto é da categoria 2- Produção de Metais Ferrosos e Não-Ferrosos (47%) e da categoria 6-Queima a céu aberto (28%), essas duas categorias somadas contribuem para 75% do total das emissões. As demais emissões se distribuem da seguinte forma: Cat.9 (9,92%), Cat.1 (6,14%), Cat.4 (3,39%), Cat.3 (2,93%), Cat.7 (1,90%), Cat.5 (0,46%) e Cat.8 (0,20%).

Tabela 1-Emissões em massa e *score* de impacto, segundo categoria de fontes e meio de lançamento, ano-base 2008, liberações de resíduos agrupadas como liberações para o solo e excluídas as liberações produtos.

Nº Categorias	Emissões				Score de Impacto			
	Ar	Água	Solo	Total	Ar	Água	Solo	Total
		(gTEQ/ano)				(DALY <sub>2008</sub> )		
1 Incineração de Resíduos	72,8	0,0	38,7	111,5	29,2	0,0	6,9	36,2
2 Produção de Metais Ferrosos e Não-Ferrosos	557,4	0,4	296,8	854,6	223,9	0,7	53,2	277,7
3 Geração de Calor e Energia	41,6	0,0	11,6	53,2	16,7	0,0	2,1	18,8
4 Produção de produtos minerais não metálicos	54,4	0,0	7,2	61,6	21,8	0,0	1,3	23,1
5 Transportes	8,3	0,0	0,0	8,3	3,3	0,0	0,0	3,3
6 Queima a céu aberto	430	0,0	79	509	172,7	0,0	14,2	186,9
7 Produção de produtos químicos e bens de consumo	2,7	10,5	21,3	34,5	1,1	17,6	3,8	22,5
8 Miscelânea	0,9	0,0	2,7	3,6	0,4	0,0	0,5	0,8
9 Disposição de Efluentes e Resíduos	0,0	12,1	168	180,1	0,0	20,2	30,1	50,4
Total	1168,1	23,0	625,3	1816,4	469,1	38,5	112,1	619,7

Fonte: MMA,2013-adaptada de

### 3.2. Distribuição entre as Regiões e Unidades da Federação

O Brasil é dividido em 27 UFs (26 Estados e um Distrito Federal), a população, em 2007, era de 183.987.291, distribuída em 5 grandes regiões, Sudeste (SP, RJ, MG e ES) com 42%, Nordeste (MA, BA, PE, CE, AL, RN, PB, PI) com 28%, Sul (PR, RS e SC) com 14,53%, Norte (PA, RO, AM, TO, AC, RR, AP) com 8% e Centro-Oeste (MT, DF, GO e MS) com 7% da população. Entre as UFs, o estado de São Paulo lidera com 39.827.570 enquanto o estado de Roraima é o menos populoso com apenas 395.725 pessoas.

Em relação a distribuição do *score* de impacto entre as grandes regiões do Brasil, a maior contribuição é da região Sudeste (64%), seguido pelo Nordeste (11%), norte (10%), sul (9%) e centro oeste (6%). As oito primeiras UFs (SP, MG, RJ, ES, PA, PR, RS, MT) representam 80% do *score* de impacto calculado para o Brasil. São Paulo possui a maior participação das emissões com 528 gTEQ/ano, correspondente ao a 166 DALY/ano, seguido por MG com 269 gTEQ/ano, correspondente ao *score* de impacto de 99 DALY/ano, e RJ com 220 gTEQ/ano, correspondente ao *score* de impacto de 72 DALY/ano.

A Fig. 1 apresenta as emissões totais em (gTEQ/ano), divididas entre as UFs e a Tabela 2 apresenta as emissões em (gTEQ/ano) e o  $score$  de impacto dividido para cada UF, o  $IS_{total}^{UF}$  em (DALY/ano).

Tabela 2. Distribuição das emissões e score de impacto segredadas por UF

UF	Emissões		Score de Impacto	
	gTEQ/ano	%	DALY/ano	%
SP	528,9	29,0	166,0	26,7
MG	268,9	14,8	99,2	16,0
RJ	219,8	12,1	72,4	11,7
ES	147,8	8,1	59,1	9,5
PA	115,9	6,4	42,6	6,9
PR	89,5	4,9	27,8	4,5
RS	54,4	3,0	16,7	2,6
MT	42,2	2,3	16,0	2,5

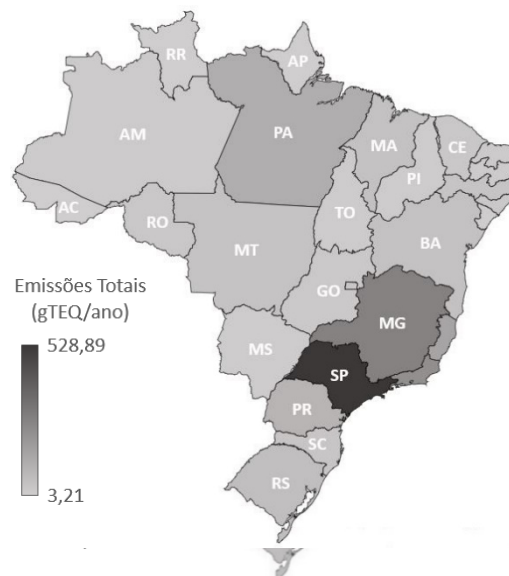


Fig. 1. Mapa de Distribuição das emissões (gTEQ/ano).

### 3.3. Subcategorias de Fontes de emissão

As 9 categorias de fonte de emissão se subdividem em 62 subcategorias. As subcategorias mais representativas de cada categoria, foram listadas na Tabela 3 conforme proporção de contribuição, foram consideradas todas as categorias que contribuem para 80% para o  $IS_{total}^{UF}$ .

As subcategorias 1a e 1c representam as principais fontes de emissão no DF. As subcategorias 2a, 2c e 2e são responsáveis pela maior quantidade de emissão para toda região sudeste e contribuem significativamente para o RS. As subcategorias 6a e 6b são as principais fontes de emissão na região Norte, parte do Centro Oeste (MT e GO) e do Nordeste (MA e PI).

Tabela 3. Principais subcategorias contribuintes para o  $IS_{total}^{UF}$ .

Nº	Descrição da Subcategoria	Contribuição da Fonte			
		50-80%	30-50%	10-30%	1-10%
1a. Incineração de Resíduos sólidos municipais		DF	RN	PE, CE, AL, PB, PI	BA, MA
1c. Incineração de resíduos de saúde					
2a. Sinterização de minério de ferro					
2c. Usinas de ferro e aço		MG, RJ, ES	SP, RS	PR, SC, PE, CE, AC	BA, GO, PB
2e. Produção de alumínio					
3a. Termelétricas a combustível fóssil					
3b. Termelétricas a biomassa				SC, AC	PR, GO, AM
3d. Aquecimento/cozimento à combustível fóssil					
4a. Produção de cimento					
4b. Produção de Cal				MG, SE	PR, RN
4c. Produção de Tijolos.					
6a. Queima de biomassa		PA, MT, GO, MA, RO, AM,	PR, MS, AL, PB, SE, AC	SP, RS, BA, SC, PE, CE, RN	MG, RJ
6b. Queima de resíduos e incêndios acidentais		TO, PI, RR, AP			

7a. Produção de celulose e papel	BA, SC, MS	PR, AL
7b. Indústria química		
9c. Disposição em águas superficiais	PR, RS, BA, GO, MS, PE, CE, DF,	SP, SC,
9b. Efluentes e lodo de tratamento de esgoto	AL, AM, RN, PB, PI, SE	RR, AP

### 3.4. Score de Impacto Total

O score de impacto total calculado para o Brasil é de aproximadamente 620 DALY, isto representa a perda de 620 anos de vida sadios. Se compararmos este valor com a carga de algumas doenças, calculadas pelo *Institute for Health Metrics and Evaluation*, o impacto na sociedade é similar ao impacto de doenças como Raiva, 216 DALY<sub>2008</sub>, Difteria 224 DALY<sub>2008</sub> e Febre Amarela 1160 DALY<sub>2008</sub> (IHME,2016).

### 3.5. Indicadores de score de Impacto nos estados brasileiros

As UFs foram ordenadas conforme  $IS_{total}^{UF}$  para estabelecer um ranking no qual São Paulo (SP) é o primeiro com 27% do impacto calculado para o Brasil, seguido por Minas Gerais (MG) com 16%, Rio de Janeiro (RJ) com 12%, Espírito Santo (ES) com 10%, Pará (PA) com 7%, Paraná (PR) com 4%, Rio Grande do Sul (RS) e Mato Grosso (MT) com 3%. Foram estabelecidos também um ranking para o score de impacto relativo a população  $IS_{pcapita}^{UF}$ , ao produto interno bruto  $IS_{\$}^{UF}$  e a área de cada UF  $IS_{km^2}^{UF}$ .

A variação de posição entre os rankings  $IS_{pcapita}^{UF}$ ,  $IS_{\$}^{UF}$  e  $IS_{km^2}^{UF}$  foi comparada a posição no ranking  $IS_{total}^{UF}$ , conforme apresentado na Fig. 2 e Fig. 3, o posicionamento de SP e ES é diferente quando ordenados conforme  $IS_{pcapita}^{UF}$  (DALY/10<sup>6</sup>habitante), o  $IS_{\$}^{UF}$  (DALY/10<sup>9</sup>U\$) e o  $IS_{km^2}^{UF}$  em (DALY/10<sup>5</sup>km<sup>2</sup>).

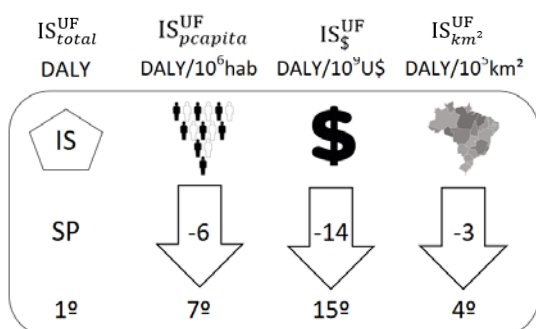


Fig. 2. São Paulo-Posição no Ranque e Variação de Posição

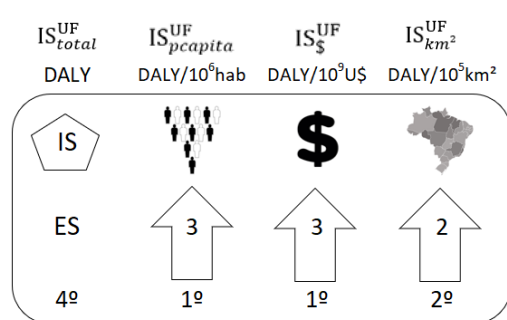


Fig. 3. Espírito Santo-Posição no Ranque e Variação de Posição

Conforme apresentado na Fig. 2, SP é o 1º no ranking de  $IS_{total}^{UF}$ , o que significa que é a UF com maior score de impacto. Porém em relação ao ranking  $IS_{pcapita}^{UF}$ , SP é 7º lugar, um decréscimo de 6 posições; em relação ao ranking  $IS_{km^2}^{UF}$ , SP ocupa o 4º lugar, um decréscimo de 3 posições. A variação quando comparamos o  $IS_{\$}^{UF}$  é ainda maior e SP decaí 14 posições e ocupa o 15º lugar no ranking.

A situação é inversa para o ES (Fig. 3), 4º lugar no ranking  $IS_{total}^{UF}$ , sobe 3 posições e fica no topo da lista para os rankings  $IS_{pcapita}^{UF}$  e  $IS_{\$}^{UF}$  o que significa que o ES tem o maior score de impacto sob a perspectiva de impacto/população e impacto/GDP. Situação semelhante para o ranking  $IS_{km^2}^{UF}$ , ocupa o 2º lugar, aumentando 2 posições no ranking.

A Tabela 4 apresenta a posição das UFs no ranking  $IS_{total}^{UF}$ , os valores de cada indicador, a posição e variação de posição em cada ranking. A posição nos rankings é indicada logo abaixo das setas, o valor dentro das setas mostra quantas posições a UF varia em relação ao  $IS_{total}^{UF}$  e a direção da seta indica se houve aumento ou redução da posição no ranking, seta para cima (piora no desempenho) e seta para

baixo uma melhor posição no *ranking*.

A partir do *ranking* apresentado na Tabela 4, verifica-se que todas as UFs com grande população com exceção de PA e ES apresentam uma redução de valores do  $IS_{pcapita}^{UF}$ , o estado da BA, por exemplo ocupa a 23<sup>o</sup> posição, uma variação de 15 posições se comparado ao *ranking* de  $IS_{total}^{UF}$ .



Tabela 4. *Score de Impacto*  $IS_{total}^{UF}$ ,  $IS_{pcapita}^{UF}$ ,  $IS_{\$}^{UF}$  e  $IS_{km^2}^{UF}$ , e gráfico indicador da variação e das posições no ranking.

UF	#	$IS_{total}^{UF}$	$IS_{pcapita}^{UF}$	$IS_{\$}^{UF}$	$IS_{km^2}^{UF}$	DALY/10 <sup>3</sup> hab	DALY/10 <sup>3</sup> US	DALY/10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup>	UF	#	$IS_{total}^{UF}$	$IS_{pcapita}^{UF}$	$IS_{\$}^{UF}$	$IS_{km^2}^{UF}$	DALY/10 <sup>3</sup> hab	DALY/10 <sup>3</sup> US	DALY/10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup>
SP	1º	166,0	4,2	0,3	66,9				DF	15º	7,3	3,0	0,1	126,7			
						7º	15º	4º							10º	27º	3º
MG	2º	99,2	5,1	0,7	16,9				GO	16º	7,0	1,2	0,2	2,1			
						5º	5º	6º							22º	24º	19º
RJ	3º	72,4	4,7	0,4	165,4				AL	17º	6,3	2,1	0,6	22,6			
						6º	11º	1º							14º	7º	5º
ES	4º	59,1	17,6	1,8	128,2				AM	18º	5,2	1,6	0,2	0,3	0		
						1º	1º	2º							18º	22º	27º
PA	5º	42,6	6,0	1,5	3,4				MS	19º	4,5	2,0	0,3	1,2		0	
						2º	2º	17º							16º	19º	23º
PR	6º	27,8	2,7	0,3	13,9				RN	20º	4,3	1,4	0,3	8,1	0		
						12º	17º	7º							20º	14º	10º
MA	7º	16,7	2,7	1,0	5,0				TO	21º	3,8	3,1	0,6	1,4			0
						11º	4º	15º							9º	8º	21º
BA	8º	16,0	1,1	0,3	2,8				PB	22º	3,2	0,9	0,3	5,6			
						23º	20º	18º							26º	21º	14º
RS	9º	16,0	1,5	0,2	5,7				PI	23º	3,2	1,1	0,4	1,3			
						19º	26º	13º							24º	12º	22º
MT	10º	15,6	5,4	0,7	1,7				AC	24º	1,7	2,6	0,5	1,0			0
						4º	6º	20º							13º	10º	24º
SC	11º	11,2	1,9	0,2	11,7				SE	25º	1,7	0,9	0,2	7,6		0	
						17º	23º	8º							27º	25º	11º
PE	12º	10,9	1,3	0,3	11,1				RR	26º	1,3	3,3	0,6	0,6			0
						21º	16º	9º							8º	9º	26º
RO	13º	8,7	6,0	1,1	3,7				AP	27º	1,2	2,0	0,4	0,8			
						3º	3º	16º							15º	13º	25º
CE	14º	8,5	1,0	0,3	5,7												
						25º	18º	12º									

O ranking  $IS_{\$}^{UF}$  é relacionado com o desempenho econômico e, portanto, nele se destacam negativamente UFs com emissões desproporcionais ao produto interno bruto, como é o caso do ES e PA que são 11º e 13º GDP do Brasil respectivamente e possuem a 4ª e 5ª maior quantidade de emissões. Neste indicador, a maioria dos estados da região sudeste e sul apresentam uma melhora significativa de desempenho, variando mais de 10 posições no ranking.

O ranking  $IS_{km^2}^{UF}$  leva em consideração a área e conseqüentemente o volume de ar disponível em cada estado. ES e RJ são uns dos menores estados do Brasil (23ª e 24ª) e são responsáveis respectivamente pela 4ª e 3ª maior quantidade de emissões, isto faz com que ocupem o topo da lista

neste *ranking*.

#### 4. Conclusão

Os indicadores dos danos potenciais à saúde humana, calculados nesta pesquisa, com base no modelo de avaliação de risco USEtox e no inventário Brasileiro de Dioxinas e Furanos possibilitou a comparação dos estados brasileiros em relação a ocorrência de doenças e mortes prematuras devida a exposição da população a este grupo de substâncias químicas.

A maioria das emissões são para o ar (64,3%), seguido das emissões para o solo (34,4%) e somente 1,3% para a água. O score de impacto calculado para o Brasil é de aproximadamente 620 DALY, a região sudeste concentra mais de 64% das emissões e do *score* de impacto e os oito estados mais representativos (SP, MG, RJ, ES, PA, PR, RS, MT) acumulam 80% das emissões e do *score* de impacto calculado para o Brasil. São Paulo possui a maior participação das emissões com 528 gTEQ, correspondente a 166 DALY de *score* de impacto. A maior parte das emissões são provenientes de duas categorias de fonte, a Produção de Metais Ferrosos e Não-Ferrosos e a Queima a céu aberto. A avaliação das UFs quanto ao *score* de impacto em razão da população  $IS_{pcapita}^{UF}$ , em razão do Produto Interno Bruto  $IS_{\$}^{UF}$  e em razão da área de cada UF,  $IS_{km^2}^{UF}$  demonstram uma variação significativa quando comparados ao *ranking* de  $IS_{total}^{UF}$

O  $IS_{pcapita}^{UF}$  indica a distribuição das emissões entre a população de cada estado (considerando uma distribuição uniforme hipotética). O  $IS_{\$}^{UF}$  leva em consideração que estados com melhor GDP possuem melhor infraestrutura de saúde pública e apresentam melhores recursos para reparar os danos. O  $IS_{km^2}^{UF}$  considera a área do estado como proporcional ao volume de ar disponível para diluição das substâncias e portando levam em conta que a população estará exposta a menores concentrações da substância o que resulta em menores danos a saúde.

A pegada química de estados e nações é importante para expressar como a qualidade de vida da sociedade é afetada pela emissão de poluentes. Dada à importância do assunto, torna-se necessário o aprimoramento desta pesquisa para ampliar o escopo de substâncias químicas, agregar impactos ecotoxicológicos e incluir uma avaliação dos custos sociais destes impactos na sociedade.

O score de impacto calculado, pela avaliação de toxicidade humana,  $IS_{total}^{UF}$ , representa um indicativo dos potenciais impactos à saúde humana causados por estas emissões e representa uma possibilidade de ordenar as categorias de fonte de emissão e pode auxiliar na tomada de decisão em políticas públicas na área de saúde e meio ambiente. A relação do  $IS_{total}^{UF}$  com indicadores demográficos, econômicos e geográficos foi apresentada como forma alternativa de comparar a pegada química dos estados brasileiros.

#### 5. Referências Bibliográficas

Bjørn A, Diamond M, Birkved M, Hauschild MZ., 2014 Chemical Footprint Method for Improved Communication of Freshwater Ecotoxicity Impacts in the Context of Ecological Limits. Environmental Science & Technology. 48(22), 13253–62.

Fantke, P., Bijster, M., Hauschild, M.Z., Huijbregts, M., Jolliet, O., Kounina, A., Magaud, V., Margni, M., McKone, T.E., Rosenbaum, R.K., Van De Meent, D., Van Zelm, R., 2017. USEtox® 2.0 Documentation (Version 1.00). USEtox® Team.

Fantke, P., Friedrich, R., Jolliet, O., 2012. Health impact and damage cost assessment of pesticides in Europe. Environment International. 49, 9–17.

Gao T, Wang XC, Chen R, Ngo HH, Guo W., 2015. Disability adjusted life year (DALY): A useful tool for quantitative assessment of environmental pollution. Science of The Total Environment. 511, 268–87.

Hauschild MZ, Goedkoop M, Guinée J, Heijungs R, Huijbregts M, Jolliet O, et al., 2013. Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 18(3), 683–97.

Hauschild, M.Z., 2005. Assessing Environmental Impacts in a Life-Cycle Perspective. *Environmental Science & Technology* 39, 81A–88A.

Hester, R.E., Harrison, R.M. (Eds.), 2006. *Chemicals in the environment: assessing and managing risk, Issues in environmental science and technology*. Royal Soc. of Chemistry, London.

Huijbregts MAJ, Rombouts LJA, Ragas AMJ, van de Meent D., 2005. Human-Toxicological Effect and Damage Factors of Carcinogenic and Noncarcinogenic Chemicals for Life Cycle Impact Assessment. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 1(3), 181.

IBGE. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2007. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/estadosat/>. Acesso: 15/04/2007.

IHME, 2016. GDB Results Tool. Institute for Health Metrics and Evaluation Seattle, WA: University of Washington.

Jones KC, de Voogt P., 1999. Persistent organic pollutants (POPs): state of the science. *Environmental Pollution*. 100(1–3), 209–21.

MMA, 2013. Inventário Nacional de fontes e estimativa de emissões de dioxinas e furanos: Brasil POPs: Plano Nacional de Implementação Convenção de Estocolmo / Ministério do Meio Ambiente. Brasília.

MMA, 2015. Plano Nacional de Implementação Brasil: Convenção de Estocolmo / Ministério do Meio Ambiente. Brasília.

Murray, C.J.L., Lopez, D.A. (Eds.), 1996. *The global burden of disease: a comprehensive assessment of mortality and disability from diseases, injuries, and risk factors in 1990 and projected to 2020; summary, Global burden of disease and injury series*. Harvard School of Public Health [u.a.], Cambridge.

Panko J, Hitchcock K., 2012. *Chemical Footprint, Ensuring Product Sustainability*. Air & Waste Management Association.

Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.M., Gold, L.S., Huijbregts, M.A.J., Jolliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H.F., MacLeod, M., Margni, M., McKone, T.E., Payet, J., Schuhmacher, M., van de Meent, D., Hauschild, M.Z., 2008. USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13, 532–546.

Sala, S., Goralczyk, M., 2013. Chemical footprint: A methodological framework for bridging life cycle assessment and planetary boundaries for chemical pollution: *Chemical Footprint Methodology for Aquatic Ecosystems*. *Integrated Environmental Assessment and Management* 9, 623–632.

Sörme, L., Palm, V., Finnveden, G., 2016. Using E-PRTR data on point source emissions to air and water—First steps towards a national chemical footprint. *Environmental Impact Assessment Review* 56, 102–112.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM - UNEP, 2005. Standardized toolkit for identification and quantification of dioxin and furans releases.

Wackernagel, M., Rees, W.E., 1996. *Our ecological footprint: reducing human impact on the earth*, New catalyst bioregional series. New Society Publishers, Gabriola Island, BC ; Philadelphia, PA.

Zijp, M.C., Posthuma, L., van de Meent, D., 2014. Definition and Applications of a Versatile Chemical Pollution Footprint Methodology. *Environmental Science & Technology* 48, 10588–10597.