

Metodología para construcción del Índice de Impacto Ambiental en el Estado de Hidalgo

1. Objetivo:

Construir indicadores que pronostiquen el grado de impacto ambiental, a partir de la emisión de gases de efecto invernadero: bióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxidos nitroso (N₂O), partículas por millón (PM), bióxido de azufre (SO₂) y Óxido de nitrógeno (Nox), en el estado de Hidalgo.

Estos gases de efecto invernadero tienen como principales fuentes los siguientes sectores:

-)] Carbono (CO₂): es consecuencia del trasportes, los servicios públicos (electricidad, gas y petróleo, entre otros) y la producción industrial.
-)] Metano (CH₄): es resultado de la actividad ganadera (bovino, porcino, caprino y ovino, entre otros).
-)] Óxido nitroso (N₂O): se relaciona con el uso de fertilizantes, quema de biomasa y transporte carretero.
-)] Partículas por millón (PM): se refiere a partes de vapor o gas por cada millón de partes de aire contaminado.
-)] Óxido de nitrógeno (Nox): sus principales fuentes son la agricultura intensiva, quema de biomasa y combustibles fósiles, fertilizantes nitrogenados y deforestación.

Con base en lo anterior, el Índice de Impacto Ambiental se califica de la siguiente forma:

Índice de Impacto Ambiental.

Índice de Impacto Ambiental (IIA)	Índice de Carbono (ICO ₂)		
	Índice de Metano (ICH ₄)	0.0<IIA < 25.0	Bajo impacto ambiental
	Índice de Óxido Nitroso (IN ₂ O)	25.1<IIA<50.0	Moderado Impacto Ambiental
	Índice de Hidrofluorocarbonos (IHFC)	50.1<IIA<75.0	Alto Impacto Ambiental
	Índice de Perfluorocarbonos	75.1<IIA<100	Muy Alto Impacto Ambiental
	Índice de Hexafluoruro de Azufre (ISF ₆)		

Fuente. Elaboración del equipo de investigación de la UAEH. México, 2017.

2. Fases Metodológicas

Con base en lo anterior, el cálculo del **Índice de Impacto Ambiental (IIA)** de cumplir con las siguientes fases:

- **Fase I:** mediante el Inventario de Emisiones de la Región Tula – Tepeji 2002, se determinan las fuentes de emisiones de gases:

Fuentes de Emisiones	Sectores
Puntuales	Energía eléctrica, industria química, cemento y cal, automotriz, petróleo y petroquímica, textiles, bienes de base de minerales no metálicos, alimentos y sustancias químicas y artículos de plástico o hules.
Móviles	Autos particulares, taxis, combis, microbuses, pick up, camiones ligeros a gasolina, camiones pesados a gasolina, particulares a diésel, vehículos menores de 3 tns diésel, vehículos mayores de 3 tns diésel, vehículos a gas LP y Motocicletas.
Área	Consumo de solventes, limpieza de superficies industriales, recubrimiento de superficies arquitectónicas e industriales, lavado en seco, artes gráficas, panaderías, pinturas (automotriz y tránsito), fugas de gas LP en uso doméstico, HCNQ en la combustión, distribución y venta de gasolina, tiraderos a cielo abierto, aplicación de asfalto, combustión habitacional, incendios forestales y ladrilleras.
Naturales	Biogénicas (número de balnearios de aguas termales).
Agricultura	Fuentes por actividad productiva en el campo, mediante la utilización de fertilizantes, herbicidas e insecticidas químicos, aguas negras y uso de maquinaria agrícola.
Ganadería	Fuentes por actividad productiva en la ganadería (bovinos, porcinos, caprinos y aves de corral, entre otros).

Tabla II. Fuentes de emisiones de gases

Fuente. Inventario de Emisiones de la Región Tula – Tepeji 2002

- **Fase II:** se determina el valor total de emisiones de gases por sector, es decir el valor total de emisiones de gases se prescribe por:

$$\bar{X}_T = \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Aplicando el valor esperado:

$$E[X_T] = E \left[\sum_{i=1}^n x_i \right] = n\bar{x} \quad (2)$$

donde:

- $E[X_T]$ es el valor esperado de emisiones del i-esimo gas del j-esimo municipio
- n es el total de unidades económicas en el j-esimo municipio.
- $\bar{x}$ es el promedio de emisiones de gasas por unidad económica.

- **Fase III:** una vez determinada el valor esperado por sector, se determina la cantidad emitida en cada fuente:

$$\bar{X}_T = \sum_{i=1}^n x_i = E[X_{Ti}]_1 + E[X_{Ti}]_2 + E[X_{Ti}]_3 + \dots + E[X_{Ti}]_n \quad (3)$$

donde:

- $\bar{X}_T$ es la cantidad total de emisiones del i-esimo gas en el estado de Hidalgo
- $E[X_{Ti}]$ es el valor esperado de emisiones del i-esimo gas del j-esimo municipio

Estos procesos se ejecutan en cada fuente de emisión.

Fase IV: posteriormente, se debe determina la proporción de emisión del i-esimo gas en la j-esima fuente, para la cual se utiliza la siguiente expresión algebraica:

$$\hat{P}_T = \left[\frac{\log(\bar{X}_T + 1)}{\log(\bar{X}_T + 1)} \right] * 100 \quad (4)$$

donde:

- $\hat{P}_T$ es la proporción de emisiones del i-ésimo gas en la j-esima fuente del j-esimo municipio.

- **Fase V:** una vez determinada la proporción de cada gas, se calcula el Índice de Imparto ambiental en el j-esimo municipio:

$$IIA_j = \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N \hat{P}_{Ti}} ; \text{ tal que } \hat{P}_{Ti} \neq 0 \quad (5)$$

donde:

- IIA_i es el Índice del Impacto Ambiental en el j-esimo municipio.
- N es el total de gases a contabilizarse en el j-esimo municipio en la i-esima fuente.

Una vez calculado el Índice de Impacto Ambiental (IIA) en el j-esimo municipio, se determinan las **fuentes influyentes**, para lo cual se siguen las siguientes fases:

- **Fase I:** se calcula el grado de contaminación de cada una de las fuentes:

$$\hat{G}_C = \left[\frac{\log(\hat{X}_{Tj} + 1)}{\log(\bar{X}_T + 1)} \right] * 100 \quad (6)$$

Donde:

- $\hat{G}_C$ es el grado de contaminación del i – esimo gas en el j – esimo municipio.
- $E[X_{Tj}]$ es el valor esperado de emisiones del i-esimo gas del j-esimo municipio.

- **Fase II:** se obtiene el promedio de contaminación de cada fuente:

$$\bar{G}_C = \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N \hat{G}_C} ; \text{ tal que } \hat{G}_C \neq 0 \quad (7)$$

Donde:

- $\bar{G}_C$ es el grado de contaminación del i – esimo gas en el j – esimo municipio.
- $\hat{G}_C$ es el grado de contaminación del i – esimo gas en el j – esimo municipio.

Es importante destacar que lo anterior corresponde a los municipios, para el caso del estado de Hidalgo se recomienda las siguientes fases:

- **Fase I:** para el cálculo del Índice de Impacto Ambiental (IIA), se debe utilizar las siguiente expresión algebraica:

$$IIA_E = \sqrt[84]{\prod_{j=1}^{84} IIA_j} ; \text{ tal que } IIA_j \neq 0 \quad (8)$$

donde:

- IIA_E es el promedio del Índice de Impacto Ambiental en el estado.
- IIA_j es el producto del Índice de Impacto Ambiental de los municipios.

- **Fase II:** una vez calculado el promedio del Índice de Impacto Ambiental, se determina la fuentes de mayor influencia, para lo cual se utiliza la siguiente expresión algebraica:

$$\bar{G}_{E_i} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{84} \bar{G}_{C_j} \quad (9)$$

donde:

- $\bar{G}_{E_i}$ es el promedio de contaminación de la i – esima fuente de contaminación en el estado.
- N es el total de municipios.
- $\bar{G}_{C_j}$ es el grado de contaminación del i – esimo gas en el j – esimo municipio.

Ejemplo:

Se desea comparar el grado de contaminación entre el municipio de Tula de Allende.

Tula de Allende

Puntuales	Unidades	Promedios					
		PM	SO2	CO2	Nox	CH4	N2O
Energía Electrica	1	3557.51	75350.34	148792.9	8180.78	134.5	209.8
Cemento y Cal	1	180.84	3150.74	56,552.30	325.04	83.8	196
Petróleo y Petroquímica	4	4079.59	86714.07	44984.7	8468.71	1717.1	10945.5
Textil	4	0.188	0.29	1.967	2.463	0.159	0.159
Alimentos	3	0.788	0.098	8.713	10.383	1.681	1.681

Móviles	Unidades	Promedios					
		PM	SO2	CO2	Nox	CH4	N2O
Autos particulares	29489	0.00034	0.00055	0.63331	0.02331	0.00007	0.28110
Taxis	344	0.00211	0.00317	1.21710	0.11190	0.00570	0.13860
Combis	147	0.00210	0.00280	4.33620	0.19710	0.01650	0.39600
Microbuses	133	0.00210	0.00360	7.89130	0.34670	0.02870	0.69070
Pick up	13270	0.00064	0.00091	0.96830	0.06960	0.00360	0.08750
Camiones ligeros a gasolina	2801	0.00064	0.00096	1.71450	0.12150	0.00620	0.14760
Camiones pesados a gasolina	491	0.00063	0.00090	5.83360	0.09610	0.01345	0.03310
Vehículos < 3 tns diésel	1474	0.03270	0.01680	0.27210	0.36710	0.00490	0.12760
Vehículos > 3 tns diésel	934	0.00390	0.00150	0.31480	0.40090	0.00530	0.12570
Vehículos a gas LP	79	0.00006	0.00000	0.05660	0.01860	0.00090	0.02140
Motociclistas	15	0.00350	0.00560	1.64900	0.00830	0.01690	0.40640

Naturales	Unidades	Promedios					
		PM	SO2	CO2	Nox	CH4	N2O
Biogénicas	2	0.000	0.000	0.000	84.790	1554.420	1554.420

Área	Unidades	Promedios					
		PM	SO2	CO2	Nox	CH4	N2O
Consumo de solventes	1	0.000	0.000	0.000	0.000	1.306	9.583
Limpieza de superficies Ind.	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.514	3.770
Recubrimientos Aqt	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.3881	2.845
Recubrimientos Ind	3	0.000	0.000	0.000	0.000	36.519	267.810
Lavado en seco	1	0.000	0.000	0.000	0.000	17.384	125.682
Artes gráficas	1	0.000	0.000	0.000	0.000	11.412	83.688
Panaderías	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.4422	3.243
Pintura Automotriz	1	0.000	0.000	0.000	0.000	3.709	27.201
Pintura de transito	1	0.000	0.000	0.000	0.000	1.3692	10.041
Tiraderos a cielo abierto	4	371.410	23.210	1949.920	139.280	2410.3	998.180

Agricultura	Unidades	Promedios					
		PM	SO2	CO2	Nox	CH4	N2O
has con sustancias químicas	6387	0.000	0.000	0.000	0.000	0.169	0.697
Quema controlada	20.03	0.000	0.000	0.000	0.000	0.038	0.010
Has irrigadas con AN	1505	0.000	0.000	0.000	0.000	4.618	2.043
Maquinaria agricola	162	0.004	0.002	3.148	0.401	0.005	0.126

Ganadería	Unidades	Promedios					
		PM	SO2	CO2	Nox	CH4	N2O
Cbz de ganado mayor	1671	0.000	0.000	0.000	0.000	6.000	0.000
Cbz de ganado menor	94159	0.000	0.000	0.000	0.000	0.620	0.000
Aves de corral	8193888	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017	0.000

Aguas Negras	Unidades	Promedios					
		PM	SO2	CO2	Nox	CH4	N2O
Aguas Negras	1505	0	0	0	0	461.841	20.43

Aplicando las expresiones algebraicas (2) y (3):

$$E[X_T] = E \left[\sum_{i=1}^n x_i \right] = n\bar{x}$$

$$\bar{x}_{Ti} = \sum_{i=1}^n x_i = E[X_{Ti}]_1 + E[X_{Ti}]_2 + E[X_{Ti}]_3 + \dots + E[X_{Ti}]_n$$

Se obtiene lo siguiente:

Tula de Allende	Fuentes	PM	SO2	CO2	Nox	CH4	N2O
	Puntuales	20059.826	425358.814	385318.007	42421.661	7092.379	44193.479
	Móviles	73.848	59.661	42024.183	3029.362	94.512	10391.104
	Naturales	0.000	0.000	0.000	169.580	3108.840	3108.840
	Área	1485.640	92.840	7799.680	557.124	9787.282	5062.203
	Agricultura	0.632	0.243	509.976	64.946	8030.456	7546.447
	Ganadería	0.000	0.000	0.000	0.000	207701.490	0.000
	Aguas Negras	0.000	0.000	0.000	0.000	695070.705	30747.150
	TOTALES	21619.946	425511.558	435651.846	46242.673	930885.663	101049.222

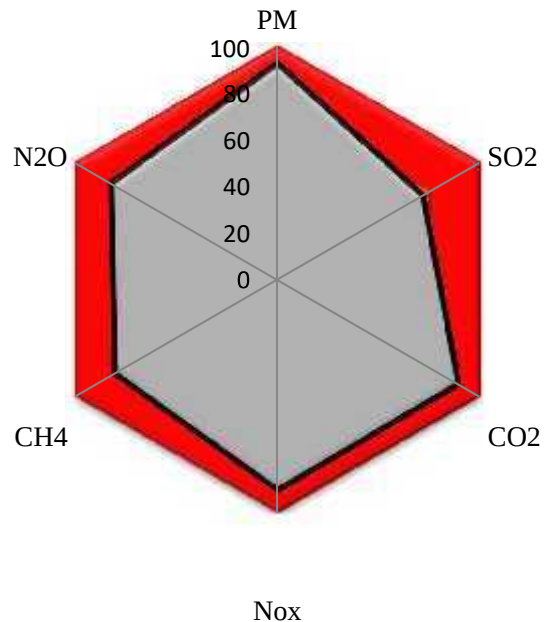
Estado de Hidalgo	TO	PM	SO2	CO2	Nox	CH4	N2O
		49265.30616	709718.0179	2082714.056	145228.4418	26932098.66	1220344.961

Aplicando la expresión (4) se tiene lo siguiente:

$$\hat{p}_T = \left[\frac{\log(\bar{x}_T + 1)}{\log(\bar{x}_T + 1)} \right] * 100$$

GASES	PROPORCIÓN	GRADO DE CONTAMINACIÓN
PM	92.38	Muy Alta Contaminación
SO2	71.70	Alta Contaminación
CO2	89.25	Muy Alta Contaminación
Nox	90.37	Muy Alta Contaminación
CH4	80.33	Muy Alta Contaminación
N2O	82.22	Muy Alta Contaminación

Comportamiento del Índice de Impacto Ambiental en Tula de Allende



Aplicando la ecuación (5):

$$IIA_j = \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N \hat{P}_{Ti}}$$

Esto es:

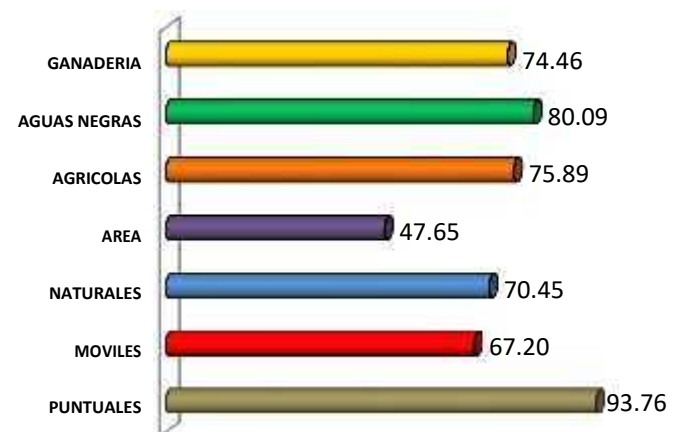
$$IIA_j = \sqrt[6]{(92.38)(71.70)(89.95)(90.37)(80.33)(82.22)}$$

$$IIA_j = 84.06$$

Con base en este resultado, se puede afirmar que existe muy alto impacto ambiental en Tula de Allende

	Proporción	GRADO DE CONTAMINACIÓN
PUNTUALES	93.76	Muy Alta Contaminación
MOVILES	67.20	Alta Contaminación
NATURALES	70.45	Alta Contaminación
AREA	47.65	Moderada Contaminación
AGRICOLAS	75.89	Muy Alta Contaminación
AGUAS NEGRAS	80.09	Muy Alta Contaminación
GANADERIA	74.46	Alta Contaminación

Fuentes de Contaminación



Estado de Hidalgo

Mediante la expresión algebraica (8):

$$IIA_E = \sqrt[84]{\prod_{j=1}^{84} IIA_j} ; \text{ tal que } IIA$$

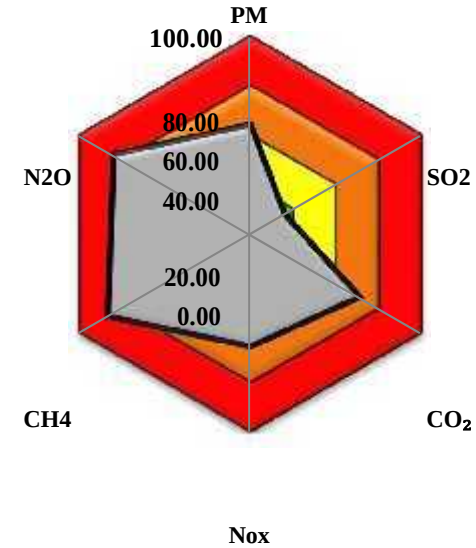
El Índice de Impacto ambiental en el estado de Hidalgo es:

$$IIA_E = \sqrt[84]{(52.75)(42.87) \dots (46.04)}$$

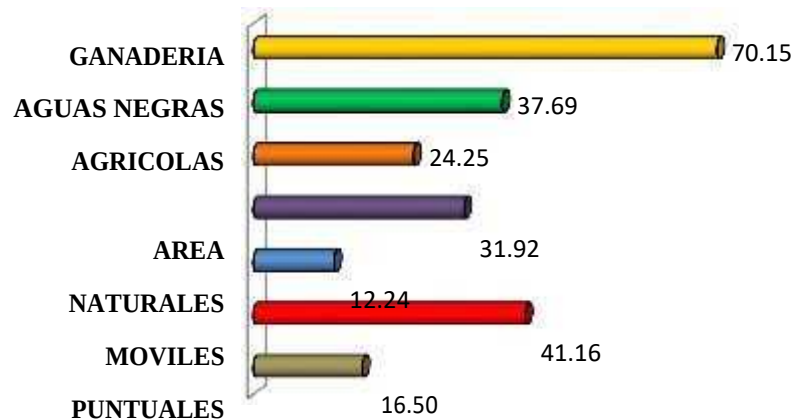
$$IIA_E = 39.80$$

Con base a este resultado, se puede decir que el promedio de impacto ambiental en el estado de Hidalgo es moderado.

Comportamiento del Índice de Impacto Ambiental en Hidalgo



Fuentes de Contaminación

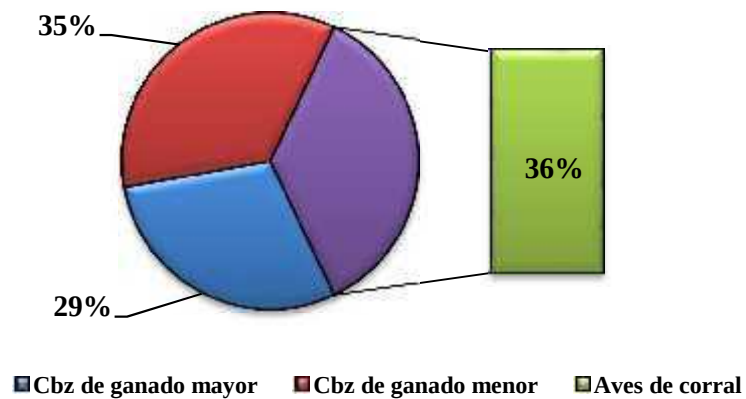


Mediante la expresión algebraica (9):

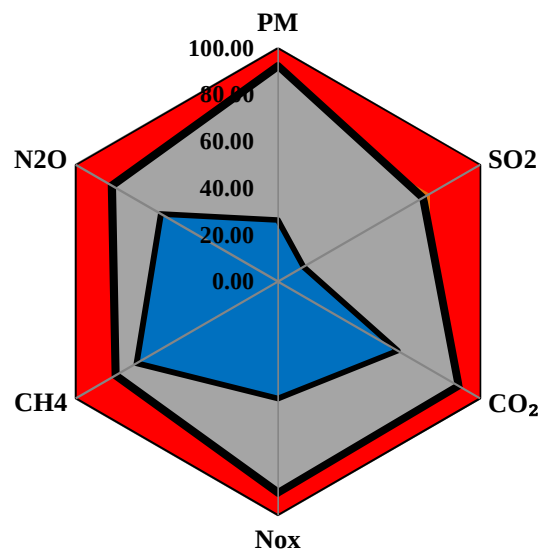
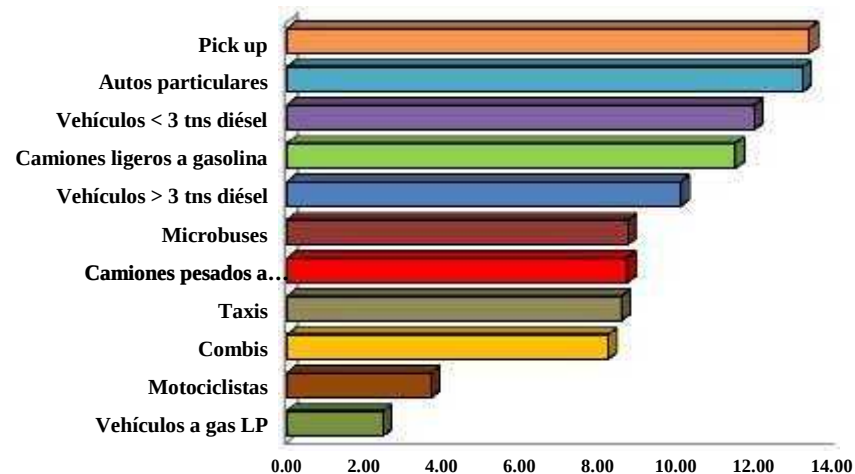
$$\bar{G}_{E_i} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{84} \bar{G}_{C_j}$$

Esta se aplica en cada una de las fuentes de contaminación.

Fuente Ganadera



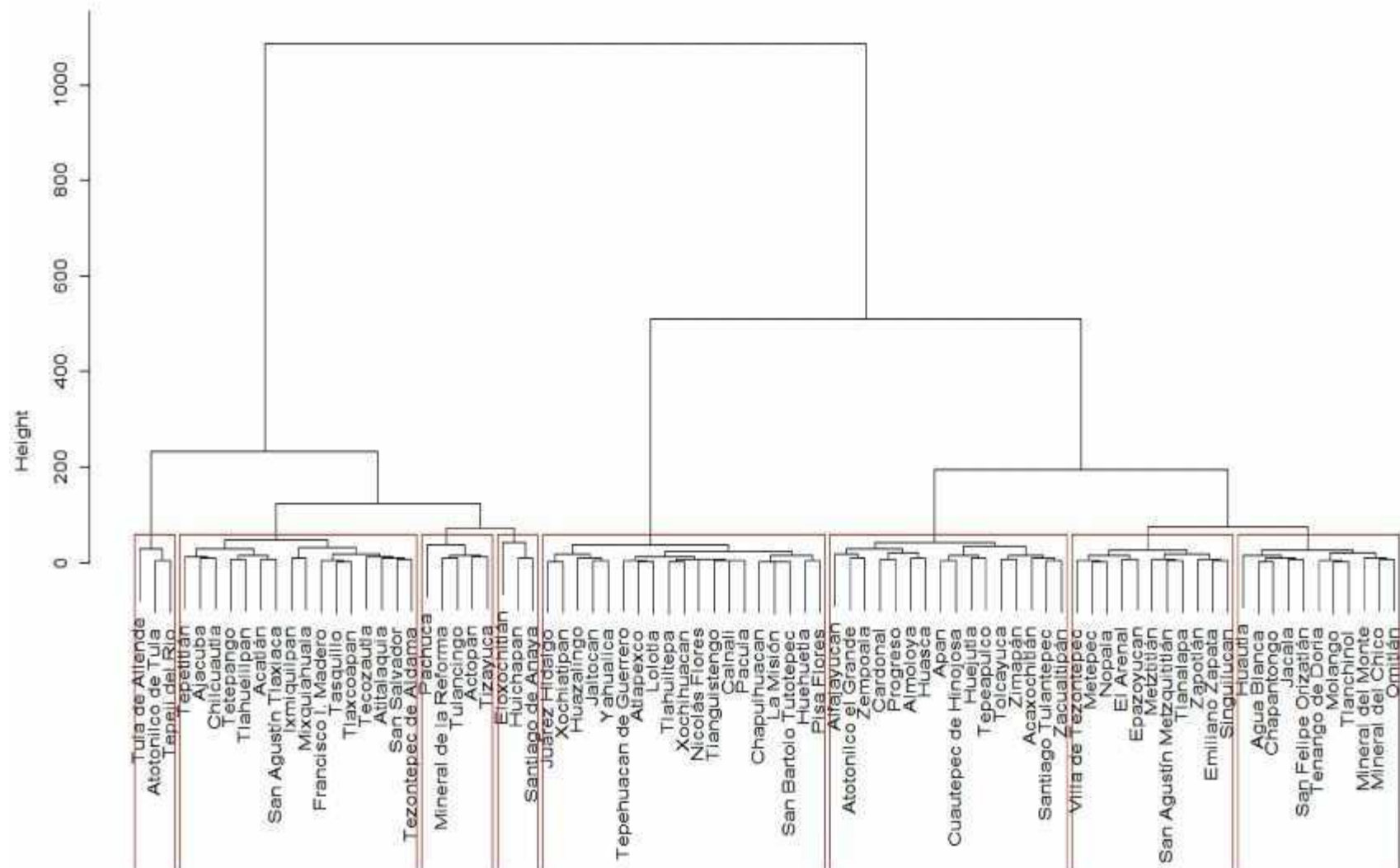
Moviles



Comparación entre los Índices de Impacto ambiental de Tula de Allende e Hidalgo.



Dendrograma Emisión de Gases



```

A
hclust ("", "ward.D")

```

GRUPO REGIONAL CON MUY ESCAZA CONTAMINACIÓN

Emisiones de Gases

Xochihuacan	Nicolás Flores	Tianguistengo	Calnalí	Pacula	Chalpulhuacan	La Misión	San Bartolo Tutotepec	Huhuetla	Pisa Flores
									

Fuentes Contaminantes

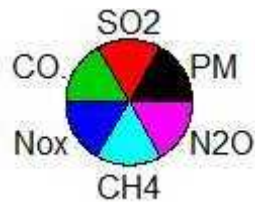
Xochihuacan	Nicolás Flores	Tianguistengo	Calnalí	Pacula	Chalpulhuacan	La Misión	San Bartolo Tutotepec	Huhuetla	Pisa Flores
									

Emisiones de Gases

Juárez de Hidalgo	Xochiatipan	Huazalingo	Jaltocan	Yahualica	Tepehucan de Guerrero	Atlapexco	Lolotla	Tlahulitepa
								

Fuentes Contaminantes

Juárez de Hidalgo	Xochiatipan	Huazalingo	Jaltocan	Yahualica	Tepehucan de Guerrero	Atlapexco	Lolotla	Tlahulitepa
								



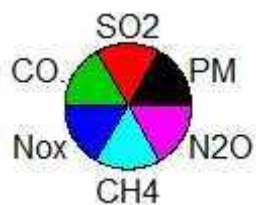
GRUPO REGIONAL CON MÍNIMA CONTAMINACIÓN

Emisiones de Gases

Huautla	Agua Blanca	Chapantongo	Jacala	San Felipe Orizatlán	Tenango de Doria	Molango	Tlanchinol	Mineral del Monte	Mineral del Chico	Omitlán
										

Fuentes Contaminantes

Huautla	Agua Blanca	Chapantongo	Jacala	San Felipe Orizatlán	Tenango de Doria	Molango	Tlanchinol	Mineral del Monte	Mineral del Chico	Omitlán
										



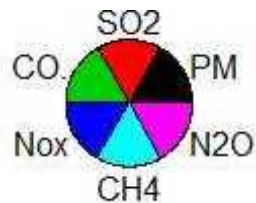
GRUPO REGIONAL CON MODERADA CONTAMINACIÓN

Emisiones de Gases

Villas de Tezontepec	Metepec	Nopala	El Arenal	Epazoyucan	Metztitlán	San Agustín Metzquititlán	Tlanalapa	Zapotlán	Emiliano Zapata	Singuilucan
										

Fuentes Contaminantes

Villas de Tezontepec	Metepec	Nopala	El Arenal	Epazoyucan	Metztitlán	San Agustín Metzquititlán	Tlanalapa	Zapotlán	Emiliano Zapata	Singuilucan
										



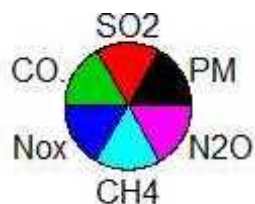
GRUPO REGIONAL CON REGULAR CONTAMINACIÓN A CONSECUENCIA DE LAS FUENTES DE AGUAS NEGRAS, MÓVILES Y DE ÁREA

Emisiones de Gases

Alfajayucan 	Atotonilco el Grande 	Zempoala 	Cardonal 	Progreso 	Almoloya 	Huasca 	Apan 
Cuatepec de Hinojosa 	Huejutla 	Tepeapulco 	Tolcayuca 	Zimapán 	Acaxochitlán 	Santiago Tulantepec 	Zacualtipan 

Fuentes Contaminantes

Alfajayucan 	Atotonilco el Grande 	Zempoala 	Cardonal 	Progreso 	Almoloya 	Huasca 	Apan 
Cuatepec de Hinojosa 	Huejutla 	Tepeapulco 	Tolcayuca 	Zimapán 	Acaxochitlán 	Santiago Tulantepec 	Zacualtipan 



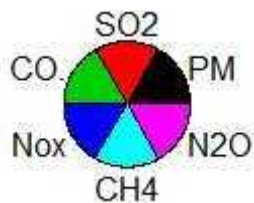
GRUPO REGIONAL CON MEDIANA CONTAMINACIÓN DE FUENTES DE AGUAS NEGRAS, AGRÍCOLA Y DE ÁREA

Emisiones de Gases

Tepetitlan 	Ajacuba 	Chilcuautla 	Tetepango 	Tlahuelilpan 	Acatlán 	San Agustín Tlaxiaca 	Ixmiquilpan 
Mixquiahuala 	Francisco I. Madero 	Tasquillo 	Tlaxcoapan 	Tecozautla 	Atitalaquia 	San Salvador 	Tezontepec de Aldama 

Fuentes Contaminantes

Tepetitlan 	Ajacuba 	Chilcuautla 	Tetepango 	Tlahuelilpan 	Acatlán 	San Agustín Tlaxiaca 	Ixmiquilpan 
Mixquiahuala 	Francisco I. Madero 	Tasquillo 	Tlaxcoapan 	Tecozautla 	Atitalaquia 	San Salvador 	Tezontepec de Aldama 



GRUPO REGIONAL CON ALTA CONTAMINACIÓN DE FUENTES MÓVILES, AGUAS NEGRAS Y DE ÁREA

Emisiones de Gases



Fuentes Contaminantes

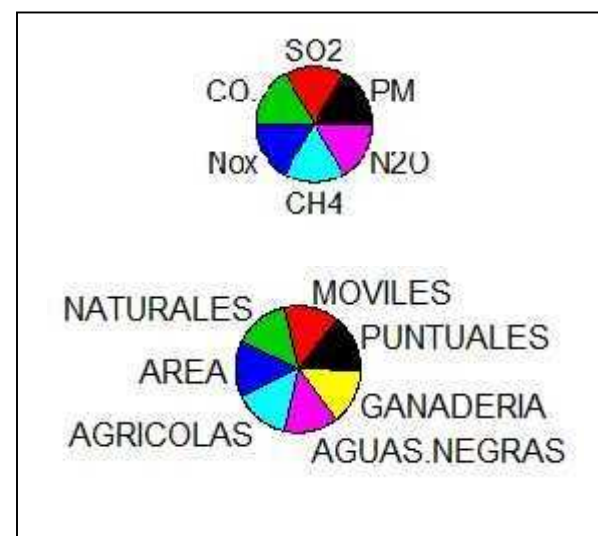


GRUPO REGIONAL ALTAMENTE CONTAMINADO POR FUENTES PUNTUALES, AGUAS NEGRAS Y AGRÍCOLAS

Emisiones de Gases

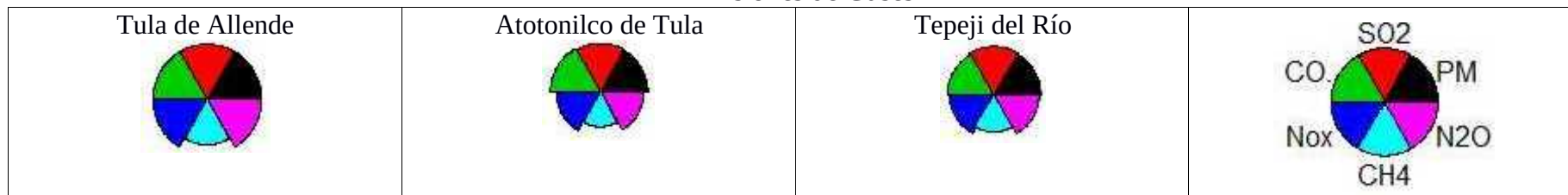


Emisiones de Gases



GRUPO REGIONAL CON MUY ALTA CONTAMINACIÓN

Emisiones de Gases



Fuentes Contaminantes

