



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Tesis para optar al Título de Magister en Ingeniería Ambiental

GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE Y EMISIONES: CASO ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO_x), EN EL DEPARTAMENTO DE LAVALLEJA - URUGUAY

Autora: Ing. Quím. JAVIERA SALAS

Tutores:

Dra. Ing. ALICE ELIZABETH GONZALEZ

Msc. Ing. NICOLAS REZZANO

MONTEVIDEO, URUGUAY

2021

Prefacio

El ser humano como especie que habita en la biósfera, ha traído consigo, intencional o culposamente, cambios que se han venido intensificando, hasta generar en los últimos años, modificaciones sobre el planeta presentadas por diversos autores como “el cambio global”. Este conjunto de cambios han generado tanto situaciones puntuales de bonanza, como de pérdidas y degradación de ecosistemas, visibles por efectos tan palpables como la extinción de especies y el colapso de ecosistemas enteros.

Las sociedades han lidiado con estas situaciones y aprendido de ellas a lo largo del tiempo, generando tradiciones, acuerdos, normativas y ejercicios de soberanía y poder, que se han respetado en mayor o menor medida y traspasado como bien cultural entre países y a lo largo del tiempo.

Tomando conciencia de esta situación, y de la influencia del ser humano como potenciador de este “cambio global”, se ha desarrollado un pensamiento hegemónico contemporáneo a este trabajo, que apunta a la posibilidad de que exista un tipo de desarrollo “sostenible” de nuestra especie, que permita que los cambios sobre el planeta, sean tales que no comprometan el desarrollo de las generaciones futuras.

Este concepto de “Desarrollo sostenible”, evolucionó en materia de gestión ambiental internacional, desde la primer conferencia de la biósfera en París en 1968, hasta plantearse como tal, en el Informe Brundtland en 1987.

El concepto, si bien tiene más de 30 años, se mantiene vigente desde entonces, y su principal premisa es que el desarrollo actual no debería comprometer el desarrollo de las generaciones futuras, y que la población, el suministro de alimentos, la extinción de especies y de los recursos genéticos, la cuestión de la energía, de la industria y de los asentamientos humanos, son factores interrelacionados que no pueden ser tratados aislados unos de los otros.

La composición y estructura de la biósfera, permite el desarrollo de la vida en la Tierra tal cual la conocemos. La atmósfera, parte de la biósfera que contiene el aire que respiramos, tiene desde hace miles de años, una composición que es determinante para nuestra vida. Los cambios sobre la composición del aire troposférico, definen en gran medida la calidad de vida a la que se ve expuesta una población, al igual que muchos otros factores ambientales. Hay evidencia científica más que robusta acumulada a lo largo de años, que indica que la exposición a los contaminantes del aire afecta la salud humana en muchas formas (Larssen et al., 2015).

Este trabajo se centra en las emisiones atmosféricas, la calidad del aire, y las acciones tendientes a proteger el aire que respiramos para mantener su calidad, las cuales se manifiestan en el ámbito técnico, como medidas de gestión, coordinadas en mayor o menor medida, a diferentes niveles.

La afectación de la calidad del aire es percibida a nivel internacional como una de las tantas cuestiones de importancia a atender por parte de los Estados, y forma parte de los llamados “Objetivos del Desarrollo Sostenible” (ODS), expuestos en la agenda 2030 adoptada por la ONU (Organización de las Naciones Unidas, 2015).

Los procesos de alteración ambiental, y especialmente los que aplican a escala planetaria, son considerados a través de instituciones internacionales capacitadas con recursos de primer nivel. Estas entidades tienen un gran peso técnico y político en la temática ambiental, y han promovido acciones internacionales que derivan en tratados, protocolos y convenios entre países.

No obstante, la existencia de estos empujes de acuerdos para la gestión de “alto nivel”, se puede percibir que los procesos de contaminación que ocurren a escala regional, nacional o local en los

territorios, tienen avances de atención muy dispares, y consideraciones geopolíticas muy específicas que dificultan la implementación real de los lineamientos de gestión impulsados a escala internacional para alcanzar los ODS.

Nuestro país forma parte de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), y ha adherido a numerosos convenios y protocolos impulsados internacionalmente, vinculados con las emisiones y calidad del aire, como ser el acuerdo marco sobre cambio climático, el protocolo de Kioto y el acuerdo de París¹.

Entre 2017 y 2019, diferentes entidades del país trabajaron para generar la propuesta del “Plan Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible” (PNADS), adoptando y adaptando los lineamientos impulsados por los ODS. La propuesta fue elaborada con la participación directa e indirecta de más de 100 técnicos que ejercen en temas ambientales, y recorrió los 19 departamentos del país para recabar comentarios. El PANDS contiene una visión integradora, constituyendo un buen punto de partida para enmarcar este trabajo, ya que presenta una visión de consensos alcanzados en sus contenidos ambientales, económicos y sociales para nuestro país. El mismo fue aprobado por el Decreto 222/019 del 05/08/2019.

En este Plan Nacional, se establecen tres dimensiones y varios objetivos. En el mismo se identificaron 10 metas involucradas con la temática de este trabajo, las cuales se dispersan en torno a las tres dimensiones definidas en el plan, como se esquematiza en la siguiente Ilustración:

Dimensión	Objetivo	Metas vinculadas
1. Un ambiente sano para una buena calidad de vida	Objetivo 1.1. Garantizar el derecho de la población urbana y rural a disfrutar de un ambiente sano y equilibrado.	Meta 1.1.2. Calidad de aire.
	Objetivo 1.5. Aumentar la resiliencia de los sistemas socioecológicos frente al cambio y variabilidad climática y otros cambios globales, contribuyendo activamente a proteger el ambiente regional y global.	Meta 1.1.8. Planificación de ciudades sostenibles.
		Meta 1.5.3. Acuerdos ambientales internacionales sobre el ambiente global. binacionales y multinacionales existentes sobre gestión de recursos compartidos.
2. Actividades económicas y productivas sostenibles	Objetivo 2.3. Reducir los impactos ambientales de las actividades industriales, de minería, infraestructura y de servicios, a través de la adecuación del marco y la incorporación de mejores prácticas y tecnologías, y de instrumentos de planificación y participación.	Meta 2.3.1. Mejores tecnologías y prácticas ambientales disponibles.
		Meta 2.3.4. Consolidación del modelo de generación de energía.
3. Gestión y ciudadanía ambiental	Objetivo 3.1. Fortalecer las capacidades de gestión en el territorio, articulando la gestión ambiental nacional y local.	Meta 3.1.2. Capacidades de fiscalización y control ambiental y presencia en el territorio.
	Objetivo 3.2. Generar e incorporar información y conocimiento para la gestión ambiental.	Meta 3.2.3. Articulación de la gestión, investigación e innovación
	Objetivo 3.3. Profundizar la educación y comunicación en la protección del ambiente.	Meta 3.3.2. Educación ambiental.
	Objetivo 3.4. Profundizar la participación y el acceso a la justicia.	Meta 3.4.3. Participación en ámbitos institucionales.

Ilustración 1- Identificación de Metas y Dimensiones del Plan Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible a las que aporta este trabajo

La tesis que se presenta a continuación, pretende contribuir a la dimensión “Ambiente sano para una buena calidad de vida”, manteniendo la posibilidad de desarrollo de las “actividades económicas y productivas sostenibles”, promoviendo la “Gestión y Ciudadanía Ambiental”, en tanto materializa reflexiones y saberes que aportarán a la educación y comunicación, relacionadas con la gestión de la calidad del aire en nuestro país.

¹ <https://tratados.mrree.gub.uy>

Tabla de contenido

Contenido

Agradecimientos	vi
Tabla de Ilustraciones	vii
Resumen ejecutivo	xii
Palabras Clave	xii
1. Introducción	1
2. Marco de referencia	2
2.1. Conceptos básicos	2
2.2. Fuentes de emisión y su evaluación	4
2.3. Estimación de emisiones	6
2.4. Transporte, dilución y modelados de dispersión	7
2.5. Clasificación de los contaminantes	7
2.6. Evaluación de Calidad del Aire	9
2.7. Contaminantes criterio y estándares OMS	10
2.8. Gestión de la Calidad del Aire y modelo conceptual adoptado	11
2.9. Estándares, valores y tendencias de la contaminación del aire:	13
3. Gestión de la Calidad del Aire en Uruguay	15
3.1. Reseña histórica de hitos relacionados con la Gestión de la Calidad del Aire en Uruguay ..	15
3.2. Evolución de contaminantes criterio en Uruguay	18
3.3. Valores de referencia para calidad de aire adecuada, en Uruguay	20
3.4. Estándares de emisión	21
3.5. Comparación de valores con estándares de emisión y calidad	22
3.6. Evolución de emisiones en Uruguay	23
4. Óxidos de Nitrógeno	28
4.1. Óxidos de nitrógeno	28
4.2. Dinámica de los compuestos de nitrógeno en aire	29
4.3. Aspectos de calidad de aire y salud	33
4.4. Fuentes de emisión de Óxidos de Nitrógeno	34
4.5. Métodos de medición de NO _x	35
4.6. Gestión de los Óxidos de Nitrógeno a nivel internacional	36
4.7. Instrumentos para la gestión de la calidad de aire en Uruguay	38
5. Producción de clinker y cemento	42
5.1. Clinker y cemento	42

5.2.	Estadísticas de producción de cemento	42
5.3.	Generalidades de los procesos de obtención de clinker y cemento.....	48
5.4.	Tipos de tecnologías asociadas a la producción de clinker.....	52
5.5.	Mejores técnicas disponibles	54
5.6.	Emisiones de la producción de clinker y cemento	56
5.7.	Emisión de NO _x desde una planta de clinker y su control:	57
5.8.	Control de la emisión de óxidos de nitrógeno.....	59
5.9.	Revisión de estándares internacionales de emisión para NO _x	63
6.	Producción de clinker y cemento en Uruguay	65
6.1.	Tipos de cemento en Uruguay	65
6.2.	Empresas y producción nacional.....	66
6.3.	Estadísticas	66
6.4.	Tecnologías de producción y empresas objeto de estudio, instaladas en Lavalleja	69
6.5.	Metodologías utilizadas para la evaluación de las emisiones de NO _x :.....	70
7.	Resultados y Discusión de resultados.....	73
7.1.	Relevamiento documental, y cargas autorizadas.....	73
7.2.	Estimación de cargas de emisión a partir del monitoreo continuo, y comparación con valores autorizados por empresa.	74
7.3.	Emisiones extrapoladas en base a medición discreta anual, y reportes declarados en los informes ambientales de operación.	74
7.4.	Comparación de factores de emisión:	75
7.5.	Emisiones vehiculares en Lavalleja	76
8.	Conclusiones	78
9	Bibliografía	81

Agradecimientos

Agradezco a mis padres Oscar Salas y Pilar González, quienes con su ejemplo y apoyo, me han enseñado el valor y la satisfacción de poder darse a lo que a uno le interesa. A mi amor y compañero de la vida Leandro Gómez, por transitar todos estos años conmigo, y a mis amigas de saberes, pensares y vivencias de estos últimos tiempos, Alexandra Avilán, Alfonsina Fernández y Jimena Ferreira.

También a la vida, y todas las cuestiones que me permitieron estar en estos momentos, destinando tiempo y dedicación a estos asuntos.

A mis tutores, Elizabeth González y Nicolas Rezzano, quienes con su vocación docente y cualidades personales, me han guiado y alentado a finalizar esta primer etapa de estudios de posgrado.

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 2- 1-Métodos de estimación de emisiones, adaptado de (Radian International LLC, 1997).....	6
Ilustración 2- 2 Características de las partículas, adaptado de (OMS, 2000)	9
Ilustración 2- 3 Contaminantes, efectos y Directrices OMS 2000 y 2005, adaptado de (Dietrich Schwela, 2009). (OMS, 2005) y (OMS, 2021).	11
Ilustración 2- 4 Interrelaciones clave para la gestión de la calidad del aire - Extraído de (Dietrich Schwela, 2009)	12
Ilustración 2- 5 Gestión de la calidad del aire –(Dietrich Schwela, 2009).....	12
Ilustración 2- 6 Tendencias sobre la contaminación por partículas, adaptado de (World Health Organization, 2016)	13
Ilustración 2- 7 Concentraciones típicas de contaminantes, adaptado de (OMS, 2005).....	14
Ilustración 3- 1 Índice de calidad de aire, departamento de Montevideo (IDM, De Nigris, & Franco, 2017).....	18
Ilustración 3- 2 Índice de calidad de aire, departamento de Montevideo (IDM, De Nigris, & Franco, 2018).....	19
Ilustración 3- 3 Valores objetivo de calidad de aire en Uruguay. Fuente: Decreto 135/021 del 04 de mayo de 2021.	21
Ilustración 3- 4 Cronograma de información nacional de inventarios, y reportes internacionales de emisiones de Gases de Efecto Invernadero, adaptado de sitio web oficial del Ministerio de Ambiente.....	23
Ilustración 3- 5 Contribución a la emisión de contaminantes por sector 2006 vs 2015.....	24
Ilustración 3- 6 Distribución de aportes por rubro, a partir del Inventario de Emisiones.	25
Ilustración 3- 7 Rubros del sector industrial y Codificación CIU 4.....	27
Ilustración 4- 1 Química de los óxidos de nitrógeno durante el día. Extraído de (Madruga, 2006) .	29
Ilustración 4- 2 Comportamiento típico diario de las concentraciones horarias de NO _x y O ₃ en Madrid.	33
Ilustración 4- 3 NO ₂ y efectos registrados. Elaboración propia a partir de trabajo de posgrado (L. Marisquirena, 2019)	34
Ilustración 4- 4 Tren de muestreo para medición de NO _x , metodología EPA 7.	35
Ilustración 4- 5 Distribución mundial de NO _x , según programa satelital “Copernicus”.	37
Ilustración 4- 6 Ton/año de emisión NO _x por sector. Fuente: Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015.....	39
Ilustración 4- 7 Emisión de NO _x por sector en % del total, fuente: (Cataldo et al., 2019).....	39
Ilustración 4- 8 Emisiones de NO _x del sector industrial por rubros en %	39
Ilustración 4- 9 Emisiones de NO _x del sector industrial por rubros en Ton/año	40
Ilustración 4- 10 Aporte vehicular e industrial.... Ilustración 4- 11 Grafico de aporte vehicular e industrial por departamento, en Ton/año.....	41
Ilustración 5- 1 Consumo mundial de cemento (Millones de Toneladas). Fuente: (FICEM, 2020) ...	43
Ilustración 5- 2 Participación por regiones en la producción de cemento de 2019. Fuente:(FICEM, 2020).....	43
Ilustración 5- 3 Principales productores de cemento, fuente: (Cembureau, 2019)	44
Ilustración 5- 4 Exportaciones e importaciones de cemento por regiones. Fuente:(FICEM, 2020) .	44

Ilustración 5- 5 Producción de cemento por países en la UE, 1998.....	45
Ilustración 5- 6 Producción de cemento Latinoamérica y el Caribe. Fuente:(FICEM, 2020)	46
Ilustración 5- 7 Consumo de cemento por país en América Latina. Fuente:(FICEM, 2020)	47
Ilustración 5- 8 Consumo per cápita de cemento fuente: (FICEM, 2020)	48
Ilustración 5- 9 Diagrama general de la producción de clinker y cemento, fuente: (Ambiente, 2019)	50
Ilustración 5- 10 Ciclo de vida de la fabricación de clinker, cemento y hormigones. Fuente: (Segovia, 2018).....	51
Ilustración 5- 11 Diagrama global diferencias de producción vía semiseca, seca y húmeda Fuente: (CER, 2001).....	53
Ilustración 5- 12 Evolución histórica de la eficiencia de los hornos de clinker en Europa. Fuente: (CER, 2001).....	53
Ilustración 5- 13 Características operativas de los procesos y hornos de clinker. Fuente:(CER, 2001)	54
Ilustración 5- 14 Aportes comparativos de los mecanismos de formación de NO _x , provenientes de la combustión del carbón (Davis, 2000)	58
Ilustración 5- 15 Emisiones de NO _x , desde hornos de clinker en la UE, según datos de 2004, categorizados según porcentaje de sustitución térmica del combustible utilizado, con relación al combustible tradicional. Fuente:(Commission, 2010).....	59
Ilustración 5- 16 Ejemplo de diseño, quemador de bajo NO _x , fuente: (Davis, 2000)	60
Ilustración 5- 17 fuente:(Commission, 2010).	63
Ilustración 5- 18 Tabla relevamiento de normativas internacionales.....	64
Ilustración 6- 1 Tipos de cemento Fuente:UNIT 20:2003.....	65
Ilustración 6- 2 Requisitos mecánicos. Fuente UNIT 20:2003.	66
Ilustración 6- 3 Requisitos físicos. Fuente UNIT 20:2003	66
Ilustración 6- 4 Requisitos Químicos. Fuente UNIT 20:2003.	66
Ilustración 6- 5 Producción de cemento por semestre. Fuente: (CCU, 2020).....	67
Ilustración 6- 6 Toneladas de cemento exportadas, fuente CCU 2019.	67
Ilustración 6- 7 Participación de exportaciones en el total de producción nacional. Fuente (CCU, 2020).....	68
Ilustración 6- 8 Destino de exportaciones.....	68
Ilustración 6- 9 Evolución del valor de producción en Uruguay. Fuente: (CCU, 2020)	69
Ilustración 6- 10 Precio comparativo de comercialización en América Latina y el Caribe (CCU, 2020)	69
Ilustración 7- 1 Cargas autorizadas, y resultantes en caso de reducciones en la concentraciones de emisión.	73
Ilustración 7- 2 Cargas autorizadas y resultantes en caso de reducción en la concentración de emisión	74
Ilustración 7- 3 Resultados obtenidos a partir del sistema de monitoreo continuo.....	74
Ilustración 7- 4 Resultados obtenidos a partir de extrapolar medición discreta, y datos de reportes IAO	75
Ilustración 7- 5 Factores de emisión de NO _x por Ton Clinker.	76
Ilustración 7- 6 Estimación de emisión de NO _x asociado al consumo de combustibles (Vehicular) 76	
Ilustración 7- 7 Estimación de masa de NO _x a remover (GAP).	77
Ilustración 7- 8 Estimación de costos asociados al sistema de abatimiento, a partir de costos de programa MTD.UE. (Commission, 2010).....	77

Siglas y acrónimos

AAE – Autorización Ambiental Especial

AAP – Autorización Ambiental Previa

AAO – Autorización Ambiental de Operación

AFOLU - Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU, siglas en inglés)

ANCAP – Administración Nacional de Combustibles Alcohol y Portland

BAT – Best Available Techniques

CCU – Cámara de la Construcción del Uruguay

CIU 4 – Clasificador Internacional Industrial Uniforme 4

CND – Contribución Determinada a Nivel Nacional

COTAMA – Comisión Técnica Asesora de la Protección del Medio Ambiente

DINACC – Dirección Nacional de Cambio Climático

DINACEA – Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental

DNE – Dirección Nacional de Energía

DNT – Dirección Nacional de Transporte

EEA – Agencia Ambiental Europea (EEA por sus siglas en inglés)

FICEM – Federación Interamericana del Cemento

GCA – Gestión de la Calidad del Aire

IMFIA – Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental

INE – Instituto Nacional de Estadística

INGEI – Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero

IPCC – Panel Intergubernamental de Cambio Climático

IPPU - Procesos Industriales y Uso de Productos (IPPU por sus siglas en inglés)

MA – Ministerio de Ambiente

MGAP – Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca

MIEM – Ministerio de Industria, Energía y Minería

MTD – Mejores Tecnologías Disponibles

MTOP – Ministerio de Transporte y Obras Públicas

OAN – Observatorio Ambiental Nacional

ODS – Objetivos del Desarrollo Sostenible

OMS – Organización Mundial de la Salud

ONU – Organización de las Naciones Unidas

PNADS – Plan Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible

SCR – Reducción Catalítica Selectiva

SNCR – Reducción Catalítica No Selectiva

SNRCC – Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático

UDELAR – Universidad de la República

UE – Unión Europea

USEPA – Agencia de Protección del Ambiente de Estados Unidos

UTE – Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas

Resumen ejecutivo

El objetivo principal del trabajo, es aportar conocimientos con relación a la gestión de la calidad del aire de Uruguay, y presentar una metodología de análisis dirigida por contaminante, para un territorio dado.

El primer capítulo presenta el marco conceptual y estado del arte respecto a la calidad del aire y emisiones atmosféricas, su gestión a nivel internacional, los contaminantes criterio y un relevamiento del estado actual de la situación en Uruguay. En los capítulos 2 y 3, se incluye una descripción de los componentes y principales actores involucrados con la temática, según un modelo conceptual promovido internacionalmente.

Luego en el capítulo 4, se presentan los Óxidos de Nitrógeno como contaminante focal, exponiendo sus potenciales efectos sobre el ambiente y la salud, y la importancia del contaminante en el escenario internacional y nacional, relativo a la calidad del aire y los modelos de gestión más comúnmente utilizados, vinculándolos con su efecto indirecto sobre el cambio climático como precursor de $PM_{2,5}$ y Ozono troposférico. Se presenta un análisis aplicado a nuestro país, para los óxidos de nitrógeno, evaluando los principales emisores y se propone una justificación con un enfoque geográfico local para el tema elegido para el caso de estudio, y las principales medidas de gestión existentes en el país con relación a los dos sectores prioritarios. Localmente para el departamento de Lavalleja, los emisores industriales de las plantas de clinker son los que contribuyen con la mayor proporción de emisión de NO_x .

En el capítulo 5 se presenta una revisión de la actividad productiva de clinker de dicho departamento, las tecnologías de producción y mitigación instaladas. En el capítulo 6 y 7 se presenta una evaluación de las cargas de emisión de NO_x registradas en Lavalleja a partir de información pública del MTOP y MA y factores de emisión y se analizan las posibles mejoras a introducir, desde un punto de vista económico, ambiental y social. Las conclusiones se presentan en el Capítulo 8.

Palabras Clave

Calidad de aire. Óxidos de Nitrógeno. Emisiones. Gestión Integrada.

1. Introducción

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021), alienta a los gobiernos desde hace más de 20 años, a impulsar políticas para gestionar la calidad del aire, de modo de proteger y mejorar la salud y calidad de vida de la población, atendiendo a los valores guía de calidad de aire, recomendados por dicha organización.

Conociendo esto, las preguntas que motivaron este estudio fueron las siguientes:

¿Por qué es importante la gestión de la calidad del aire?

¿Cómo se gestiona la calidad del aire en Uruguay?

¿Cómo podría abordarse la gestión de un contaminante para una localidad dada?

¿Qué contaminantes y territorios sería recomendable continuar estudiando en Uruguay?

El objetivo general de la tesis es responder estas preguntas, y el trabajo aborda la comprensión de la gestión de la calidad del aire en Uruguay así como la identificación y conceptualización de los componentes y actores clave, a través de un enfoque descriptivo, realizado en base a revisiones bibliográficas, documentales, y consultas con actores clave, lo cual se presenta en los primeros 3 capítulos.

En los restantes capítulos, se realiza un análisis de caso, con un enfoque holístico desde el punto de vista de la gestión de la calidad del aire, analizando la situación para un determinado contaminante, dentro de un departamento.

Si bien hay diversas situaciones que podrían haberse tomado como caso de estudio, se puso foco en los Óxidos de Nitrógeno y el Departamento de Lavalleja, motivado en las razones que se presentan en el capítulo 4, y en adición, en que el estudio proporciona conocimientos para complementar el análisis del desempeño ambiental y una situación existente con las emisiones de la producción nacional de clinker, de cara al nuevo Decreto reglamentario de calidad de aire (135/021), promulgado en mayo de 2021.

Para ello se usó uno de los inventarios de emisiones existentes, se relevó los estándares de emisión aplicables, y se realizó una estimación de cargas de los aportes mayoritarios entre junio 2020 y junio 2021, con el uso de información pública disponible en el Ministerio de Ambiente y del Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Se calcularon y compararon los factores de emisión observados para el sector de clinker con los que tienen estas producciones a nivel internacional, y se llegó a la selección y relevamiento de costos de abatimiento, de implementar una medida de mitigación priorizada justificadamente como efectiva, para el control de las emisiones de dicho contaminante, considerando las Mejores Tecnologías Disponibles a nivel internacional.

Adicionalmente el análisis realizado presenta el escenario económico mundial y regional de transacciones de cemento, situando la producción nacional, para poder sumar consideraciones económicas al estudio realizado.

2. Marco de referencia

Los efectos de la contaminación atmosférica sobre los seres humanos, han sido registrados desde varios siglos antes de Cristo. Las observaciones se centraron primeramente en enfermedades adquiridas por trabajadores en el ámbito de la minería, y luego se incorporaron diversas problemáticas asociadas con el uso de ciertos carbones como energéticos, siendo los efectos agudos el foco de atención principal. Esta problemática con el uso del carbón se sostiene en algunos lugares hasta la contemporaneidad, considerando los episodios graves de contaminación ocurridos en los primeros meses de 2019 en la capital de Mongolia, Ulán Bator, donde la quema de carbón principalmente para calefacción, ocasionó concentraciones sostenidas de material particulado PM_{2.5} “más de 100 veces los estándares establecidos por la OMS”, lo que obligó al gobierno de turno a suspender las clases en primaria, para cuidar a la infancia evitando la exposición a la contaminación². El proceso de combustión para generación de energía es uno de los más útiles para la humanidad, pero también es el causante de la mayor parte de la contaminación del aire a la que nos vemos expuestos en las ciudades.

Si bien las emisiones atmosféricas liberadas desde fuentes naturales son mucho mayores que las generadas por fuentes antropogénicas, la distribución y dispersión global de dichos contaminantes, resultan en concentraciones promedio de un bajo valor relativo, salvo pocas excepciones localizadas en el tiempo o espacio. El arrastre por el viento, la oxidación, precipitación y absorción en los océanos y el suelo, son procesos que depuran la atmósfera de los contaminantes si se consideran tiempos suficientes.

Con la revolución industrial, la intensificación de las actividades productivas y la posibilidad extendida del uso del carbón y otros energéticos, se sucedieron una serie de situaciones agudas y locales de contaminación, con incluso mortandad de población y otros seres vivos, situaciones agudas que contribuyeron a que los gobernantes de estos países tomaran las primeras medidas normativas de “aire limpio”, en el correr de los años 1850 (Seoánez, 2002). Estos países en su mayoría lograron controlar efectivamente los episodios agudos de contaminación del aire y han desarrollado tecnologías y metodologías de gestión tendientes a mantener y reducir las concentraciones de contaminantes a las que se ven expuestos los ciudadanos, las cuales se han modificado y extendido, siendo hoy por hoy las más utilizadas a nivel internacional.

La Unión Europea (UE) y la Agencia de Protección del Ambiente de Estados Unidos (US-EPA), son las dos entidades regulatorias con mayor liderazgo a nivel internacional en materia de calidad de aire, y sus concepciones respecto al tema se han extendido fuertemente por el mundo, siendo éstas adoptadas por las recomendaciones realizadas en el marco de la ONU, y sus diversos organismos.

2.1. Conceptos básicos

Contaminación atmosférica

La Real Academia Española, define la contaminación atmosférica como la presencia en la atmósfera de materias, sustancias o formas de energía que impliquen molestia grave, riesgo o daño para la seguridad o la salud de las personas, el medioambiente y demás bienes de cualquier naturaleza.

Las unidades en que se expresan los niveles de contaminación del aire, varían según la naturaleza del contaminante y el tipo de evaluación a realizar. Hay dos tipos de valores de interés, valores de emisión y de inmisión.

Emisión

² <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2019/03/los-ninos-son-los-que-mas-sufren-en-las-ciudades-mas-contaminadas-del-planeta> - consultado junio 2021

Una emisión es la liberación de contaminantes a la atmósfera desde una fuente. Midiendo la concentración del contaminante en un volumen conocido de gas y determinando la tasa de liberación del flujo del gas, por ejemplo, en una chimenea, es posible calcular la tasa de emisión en masa del contaminante o la carga del contaminante que es liberada. Las unidades de medida más utilizadas para describir una emisión, dependiendo del emisor y el estudio que se quiera realizar, son gramos por segundo o Toneladas por año (para carga de contaminante), y miligramos por metro cúbico normal, para concentración. Las evaluaciones discretas sobre las emisiones al aire, suelen realizarse durante períodos de tiempo de algunas horas, dependiendo del tipo de proceso por el cual se genere la emisión, si el mismo es en batch o en continuo.

Las mediciones continuas a nivel de emisión, no suelen considerar intervalos de tiempo inferiores a los 10 minutos, a los efectos de mitigar el error que causa el flujo turbulento que fluye generalmente por una chimenea.

Más adelante se presentan las principales fuentes de emisión, su forma de cuantificación y sus características, pero es importante destacar que, dadas las características de los gases y su vinculación con la temperatura y presión, las concentraciones de contaminantes en las emisiones provenientes de procesos específicos (por ejemplo, las que ocurren a altas temperaturas), son estandarizadas a condiciones normales ($T=273\text{ K}$ y $P=1\text{ atm}$) para poder ser comparadas con valores de referencia. Asimismo en procesos de combustión, las emisiones son referenciadas a cierto porcentaje de oxígeno, a los efectos de considerar el efecto de dilución existente por la inyección de aire.

Estas emisiones de contaminantes, luego de liberarse desde el emisor, son diluidas en el aire del ambiente, transportadas, y en ocasiones transformadas mediante reacciones fisicoquímicas, hasta que llegan a las zonas en las que el aire interactúa con los receptores.

Los mecanismos de dilución y transporte dependen de varios factores, entre ellos de las condiciones de liberación de la emisión (altura, dirección, temperatura de gases, velocidad de salida), de las condiciones atmosféricas (temperatura del aire ambiente, velocidad del viento, altura de capa límite, humedad ambiente), y de las condiciones geográficas de la zona (pendientes, bosques, ríos, edificaciones cercanas).

Existen herramientas informáticas, que pueden simular estos mecanismos, las que son útiles para estimar ciertos parámetros de interés, para evaluar potenciales impactos que podrían generarse en diversos escenarios. Asimismo, estos modelados pueden validarse, mejorarse y retroalimentarse, con medidas de emisión y calidad de aire en el entorno de la zona simulada. Este tipo de encare para el análisis de situaciones, usualmente se encuentra con limitaciones tanto desde el punto de vista matemático o de comprensión de los mecanismos que intervienen, como económicas debido a sus altos costes de inversión, para conocer con determinada precisión, los valores de las variables que influyen en el modelado.

Inmisión

Se denomina inmisión, al contenido del contaminante considerado a nivel de calidad de aire, en un sitio, donde puede ser respirado por los receptores.

Para la evaluación cuantitativa de la inmisión, comúnmente se emplean unidades de concentración de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (concentraciones mil veces menores a las asociadas a valores de emisión) o bien ppm o ppb (v/v) (Wark, Kenneth; Warner, 1999). Las evaluaciones de calidad de aire, vinculan estas concentraciones con su permanencia en el aire durante un tiempo determinado, evaluaciones que, dependiendo de las características de la sustancia y del tipo de análisis que se quiera realizar, puede implicar períodos horarios, de 8 horas, diarios, mensuales, anuales o para períodos aun superiores. Las condiciones de medición de calidad de aire, suelen tener variaciones relativamente pequeñas de presión y temperatura, y las mismas suelen referenciarse a condiciones estándar ($T=298\text{ K}$ y $P=1\text{ atm}$).

Es importante conocer para las evaluaciones de calidad de aire, las condiciones meteorológicas a las que se asocian los niveles de concentración reportados, especialmente aquellos de velocidad y

dirección del viento durante las mediciones, así como también la posición relativa de los principales emisores de la zona.

Usualmente previo a la definición de una estrategia de medición para el monitoreo de calidad de aire en torno de un escenario de emisiones, se corren modelos matemáticos que simulan el escenario a estudiar, en base a condiciones meteorológicas de la zona con históricos de al menos 3 años de datos, de modo de que, conociendo en términos generales el comportamiento de la zona, los equipos de medición de calidad de aire que corresponda puedan ubicarse en la forma más efectiva a los objetivos del estudio.

2.2. Fuentes de emisión y su evaluación

Las fuentes de emisión tienen diversos orígenes, pudiendo ser naturales como las que se generan por procesos bio-geológicos como volcanes, erosión y arrastre eólico, procesos bacterianos de descomposición o incendios forestales. Estas fuentes determinan en gran medida conjuntamente con la meteorología, los valores basales de calidad de aire en un lugar a lo largo del tiempo, a los que se les suman los aportes que puedan generarse por las fuentes antrópicas. Las fuentes antrópicas son aquellas provenientes de actividades humanas.

Importa conocer que los emisores pueden clasificarse en fuentes fijas y fuentes móviles.

- Las fuentes móviles son aquellas tipo automóviles, barcos, aviones u otras con características de desplazamiento de la emisión en el espacio y tiempo considerados.
- Las fuentes fijas, a su vez, pueden dividirse como puntuales (chimeneas o ductos de emisión), difusas (provenientes de pérdidas por sitios no definidos), lineales (como calles muy concurridas), o de área (ciudades). Esta clasificación se utiliza para la consideración de las diferentes fuentes en simulaciones, y puede variar dependiendo de la escala espacial y temporal que se esté considerando.

A los efectos de la gestión de la calidad del aire, a nivel internacional las emisiones antrópicas se agrupan en sectores.

Según esto, se presentan las siguientes clasificaciones, de importancia a nivel nacional:

Según las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (GEI)³, las emisiones se agrupan en 4 sectores⁴:

- **Sector Energía:** incluye las emisiones generadas por la quema de combustibles fósiles (derivados del petróleo y gas natural), así como las emisiones fugitivas de los combustibles (emisiones provenientes de descargas accidentales, fugas de equipos, pérdidas en la carga de tanques, quema en antorcha, fugas en ductos, pérdidas en almacenamiento, venteo, y todas las demás emisiones directas excepto aquellas debidas al uso de combustibles). A su vez, aparecen en este grupo, otras emisiones procedentes de los bunkers internacionales (combustible consumido en el transporte internacional, tanto marítimo como aéreo) y las emisiones de CO₂ procedentes de la quema de biomasa para generación de energía.
- **Sector de Procesos Industriales y Uso de Productos (IPPU):** En este sector se abordan las emisiones de GEI provocadas por los procesos industriales, por el uso de GEI en los productos y por los usos no energéticos del carbono contenido en los combustibles fósiles.

³ <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html> - consultado marzo 2021

⁴ <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/inventarios-nacionales-gases-efecto-invernadero-ingei> - consultado marzo 2021

Las emisiones por el consumo de energía durante el proceso industrial son consideradas dentro del Sector Energía.

- **Sector de Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU):** En este sector se consideran las emisiones de GEI originadas en las actividades y prácticas agropecuarias, así como las emisiones y remociones de CO₂ por el uso y los cambios en el uso de la tierra. Se pueden citar la fermentación entérica, manejo de estiércol, cultivo de arroz, suelos agrícolas, quema en campo de residuos agrícolas, cambio de biomasa de bosque y otro tipo de vegetación leñosa, conversión de bosques y praderas, abandono de tierras cultivadas, emisiones y remociones de CO₂ del suelo, entre otros procesos.
- **Sector Desechos:** Este sector comprende la estimación de emisiones de CH₄, N₂O y CO₂. El CH₄ es originado a través de un proceso anaerobio de descomposición de la materia orgánica, contenida en los residuos sólidos urbanos, del tratamiento biológico de residuos, y de las aguas residuales domésticas, comerciales e industriales. Las emisiones de N₂O provienen del excremento humano y ocurren cuando éste se descarga en cursos de agua o cuando es procesado en fosas sépticas o sistemas de tratamiento de aguas servidas. Además, se estiman las emisiones de N₂O en las incineraciones y el tratamiento biológico de residuos. Las emisiones de CO₂ provienen de la quema de residuos.

Uruguay cuenta con series históricas anuales en sus INGEI, desde el año 1990 al 2017, y ha presentado 5 informes bienales internacionalmente, el último elaborado en el año 2019.

Por otro lado, se tienen dos inventarios nacionales de emisiones atmosféricas, elaborados en 2010 y 2019 en convenios específicos entre Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República y el Ministerio de Ambiente, donde se consideraron las actividades de los siguientes cinco sectores:

- **Sector Vehicular,** que contempla las emisiones estimadas debidas al consumo de combustible en vehículos según el parque automotriz del país, considerando las diferentes categorías vehiculares y tecnologías de control de gases de escape.
- **Sector Agropecuario:** las actividades emisoras consideradas son aquellas vinculadas al consumo de combustibles del sector agropecuario, según la Dirección Nacional de Energía (súper gas, gasoil, fueloil, leña y gasolina).
- **Sector Residencial:** las actividades emisoras son las siguientes, vinculadas al consumo de combustibles: iluminación, cocción, calentamiento de agua, calefacción, conservación de alimentos, refrigeración y ventilación, bombeo de agua, fuerza motriz y otros artefactos, según la información disponible proveniente de la Dirección Nacional de Energía (DNE).
- **Sector Servicios y comercios:** las actividades emisoras son las vinculadas al consumo de combustibles por parte del sector, según la información proveniente de la DNE.
- **Sector Industrial:** las actividades corresponden a todas las realizadas en las plantas industriales del país, que tienen emisiones al aire.

En el inventario de emisiones elaborado en el año 2019 se consideró, además de estos mismos rubros contemplados en el inventario elaborado en 2010, la estimación de emisiones de material particulado, provenientes de los sectores “erosión eólica” y “rodadura”.

Es importante recalcar que existen diferencias notables entre las metodologías de cuantificación del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, y las del Inventario Nacional de Emisiones Atmosféricas. Por ejemplo, la configuración dada para el sector energético de la Agencia Europea, cuenta las emisiones vehiculares y las generadas por la quema de energéticos en la industria, dentro de dicho sector energía, mientras que el inventario de emisiones atmosféricas, cuantifica estos aportes por separado, tomando como base las referencias de la USEPA.

2.3. Estimación de emisiones

Se tienen seis tipos de técnicas básicas para la cuantificación o estimación de emisiones, las cuales traen asociados tanto costos como niveles de confianza de diferentes niveles; A continuación se listan y describen brevemente. Si bien la exactitud de la estimación dependerá de la exactitud relativa de cada uno de estos componentes individuales y sus errores relativos, en términos generales se puede presentar la relación entre costos y confiabilidad del tipo de estimación, según la ilustración 2.1.

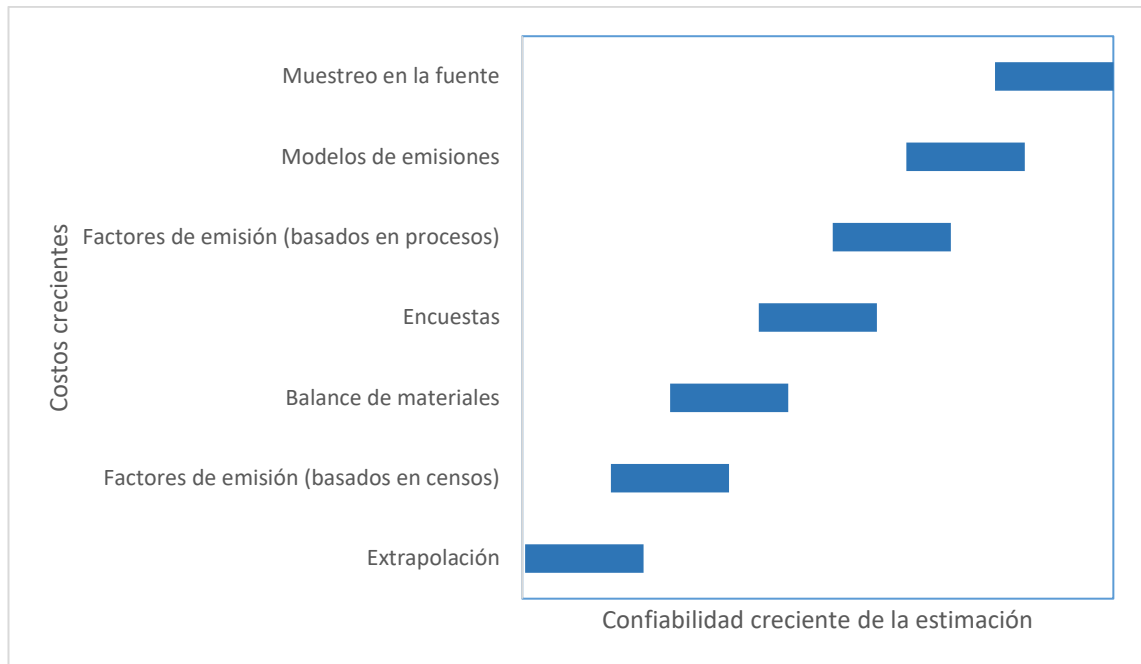


Ilustración 2- 1-Métodos de estimación de emisiones, adaptado de (Radian International LLC, 1997)

- a. Muestreo en la Fuente: Refiere a mediciones directas de la concentración de contaminantes en un volumen conocido de gas y de la tasa de flujo del gas en la chimenea. Son utilizadas con mayor frecuencia para fuentes puntuales.
- b. Modelos de Emisión: son ecuaciones desarrolladas cuando las emisiones no se relacionan directamente con un solo parámetro. Se suelen usar computadoras en el caso de que se tenga un gran número de cálculos complejos.
- c. Encuestas: son cuestionarios diseñados para recopilar datos de emisiones. A menudo son utilizados para recopilar datos de fuentes puntuales desarrollados a nivel de establecimiento o bien datos de fuentes de área de un muestreo representativo de fuentes dentro de una categoría dada.
- d. Factores de Emisión: son relaciones entre la cantidad de un contaminante emitido y una sola unidad de actividad. La actividad puede, consistir en datos basados en procesos (e. g., producción, horas de operación, área superficial) o en datos basados en censos (e. g., población, número de empleados, cantidad de vehículos).

- e. Balance de masa: se usan mediciones de todos los componentes, de un proceso, excepto el aire para determinar las emisiones al aire. Es utilizado con mayor frecuencia para fuentes de evaporación de solventes cuando no hay datos disponibles para apoyar los otros enfoques.
- f. Extrapolación: consiste en el escalamiento de las emisiones de una fuente dada a otra con base en un parámetro de escalamiento conocido para ambas fuentes (e. g., cantidad de producción, área del terreno, número de empleados).

Se utilizan unas u otras técnicas de cuantificación, en función del tipo de análisis que se esté realizando.

Por ejemplo, en los estudios de impacto ambiental, en ausencia de datos reales sobre los procesos a implementar, es común usar la simulación por factores de emisión escalados a la actividad industrial que se realizará, con la finalidad de estimar las emisiones de las fuentes puntuales, posicionarlas en el espacio y luego difundirlas en el entorno utilizando la meteorología local o escenarios “worst case”, a los efectos de determinar el aporte que el nuevo proyecto podría generar sobre la calidad del aire. A esto, debe sumarse el nivel basal de contaminación en el área de estudio.

Las técnicas de medición en la fuente son, más bien, utilizadas para el seguimiento y control de las emisiones de fuentes fijas industriales que lo requieran, durante su fase operativa.

La extrapolación es utilizada, por ejemplo, para estimar emisiones provenientes de grandes extensiones de terreno para reportes de gases de efecto invernadero.

2.4. Transporte, dilución y modelados de dispersión

Un mismo valor de emisión en carga, puede generar concentraciones de inmisión muy diferentes al difundirse en el territorio, dependiendo de las características de la fuente emisora, de las condiciones propias del terreno y del comportamiento meteorológico de la zona. Los modelos de dispersión pretenden simular estos efectos, para lo cual el analista debe considerar la escala del estudio, elegir el tipo de simulación a realizar y definir adecuadamente el escenario de la simulación. En los estudios de evaluación de impacto ambiental realizados en Uruguay, los modelos más extensamente utilizados son el AERMOD y el SCREEN3, ambos modelos de uso común a nivel internacional, basados en los supuestos de la dispersión gaussiana, con penachos en estado estacionario.

La División Calidad Ambiental de DINACEA dispone además de un modelo de dispersión también gaussiano desarrollado por la Facultad de Ingeniería de la UDELAR, para la evaluación de situaciones reales, o potenciales para la simulación de otros escenarios.

Las series de datos meteorológicos más utilizadas, han sido históricamente las generadas por aeropuertos o estaciones meteorológicas. No obstante, se pueden comprar registros satelitales internacionales, que miden series de datos en diferentes posiciones de altitud. En Uruguay, los parques eólicos también están generando, a sus efectos, importantes series de observación para la cuantificación eólica.

2.5. Clasificación de los contaminantes

Los contaminantes del aire pueden clasificarse según su naturaleza, los efectos que cause sobre el ser humano o su origen.

Por su naturaleza, pueden clasificarse en Compuestos de Azufre, de Nitrógeno, Inorgánicos de Carbono, Orgánicos, Metales, Oxidantes Fuertes y Agentes Biológicos.

Según sus efectos en el ser humano, se clasifican en: Irritantes, Neumoconióticos, Tóxicos sistémicos, Anestésicos y narcóticos, Cancerígenos, Alérgenos, Patógenos, Asfixiantes, Productores de dermatosis y de efectos combinados.

También pueden dividirse en contaminantes primarios y secundarios. Considerando éste el enfoque con el que se continuará este trabajo, se detalla lo siguiente con relación a éstos.

Los contaminantes primarios son aquellos que son vertidos directamente desde las fuentes de emisión, y causan lo que se conoce como contaminación convencional, la cual suele tener un ámbito local limitado al entorno de los focos emisores, pudiendo ser partículas sólidas o líquidas, gases como SO₂, NO₂, CO u otras sustancias que puedan encontrarse, como ser metales pesados (Pb, Cr, Cu u otros), compuestos orgánicos volátiles, o compuestos halogenados.

Las partículas se dividen según el tamaño de las mismas, su forma y composición química. El tamaño de éstas se encuentra en términos generales entre 0,1 a 1000 µm.

Las partículas de diámetro inferior a 0,1 µm, generan movimientos al azar, que producen choques entre ellas que dan lugar a agregados de mayor tamaño en un proceso denominado coagulación.

Las partículas entre 0,1 y 10 µm, tienden a formar suspensiones mecánicamente estables, por lo que se denominan "partículas en suspensión", y permanecen en el aire durante períodos de tiempo relativamente altos, pudiendo ser transportadas a grandes distancias por acción del viento.

Las partículas de tamaño mayor a 10 µm, suelen sedimentar en períodos relativamente cortos, por lo que sus efectos son visibles en el entorno de los emisores, y se las conoce como "material sedimentable".

El tamaño determina en gran medida el grado en que estas partículas son ingresadas al cuerpo humano, pudiendo las de mayor tamaño quedar atrapadas en el las vías respiratorias superiores (deposición en las vías superiores), como las más pequeñas pueden llegar a los alvéolos pulmonares y depositarse allí, donde pueden interactuar con el sistema circulatorio.

La composición química puede variar mucho, dependiendo fundamentalmente de su origen. Las partículas provenientes del suelo, contienen principalmente compuestos de calcio, aluminio y silicio; los humos procedentes de la combustión del carbón, petróleo, madera y residuos domésticos pueden contener compuestos orgánicos, y trazas de metales contenidos en los combustibles, los cuales pasan a formar parte de estas partículas, por lo general como óxidos metálicos.

Por otro lado, se encuentran los contaminantes secundarios, los cuales no se vierten directamente a la atmósfera desde los focos emisores, sino que se producen como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas y fotoquímicas que sufren los contaminantes primarios en el aire.

Las principales alteraciones atmosféricas producidas por los contaminantes secundarios, son la contaminación fotoquímica y la acidificación del medio.

La contaminación fotoquímica, se produce como consecuencia de la aparición en la atmósfera de oxidantes originados al reaccionar entre sí los óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y el oxígeno en presencia de radiación ultravioleta de los rayos solares. El resultado de esto, es una mezcla de sustancias de gran poder oxidante, conocida también como smog fotoquímico. El ozono es la más abundante de tales sustancias.

La acidificación del medio, corresponde a la pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera desde los procesos de combustión de combustibles fósiles, y depositados en deposición seca como parte del material particulado, o deposición húmeda al disolverse en las gotas de lluvia que se forman en las nubes. Como ejemplo

de la importancia de estos fenómenos, se puede citar que el pH de lluvias ácidas observadas en Escocia, ha llegado a valores de entre 2,4 y 3. En la Ilustración 2.2 a continuación, se presenta un esquema de lo anteriormente mencionado:

	Partículas finas	Partículas gruesas
Compuesto por	Gases	Sólidos grandes/ gotas pequeñas
Formado por	Reacción química; nucleación; condensación; evaporación de niebla y gotas de nubes donde los gases se han disuelto y reaccionado.	Disrupción mecánica (por ejemplo trituración, abrasión de superficies); evaporación de atomizadores; suspensión de polvo.
Compuesto de	Sulfatos, nitratos, amonios, iones Hidrógeno, carbón elemental, compuestos orgánicos (por ej. hidrocarburos aromáticos policíclicos); metales (por ej. Cd, Pb, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe); agua ligada a las partículas.	Polvos resuspendidos (polvos del suelo, de la calle), ceniza de carbón y petróleo, óxidos metálicos de elementos presentes en la corteza terrestre (Si, Al, Ti, Fe); CaCO ₃ , NaCl, sal marina, polen, esporas de moho, fragmentos de animales y plantas, restos de llantas gastadas.
Solubilidad	Muy soluble, higroscópico y delicuescente.	Muy insoluble y no higroscópico.
Fuentes	Combustión de carbón, aceite, gasolina, diésel, madera; productos de transformación atmosférica de NO _x , SO ₂ , y compuestos orgánicos, incluyendo las especies biogénicas (por ej. terpenos), procesos de altas temperaturas, fundición, fábricas de acero, etc.	Resuspensión del polvo industrial y de la tierra removida (por ej. por la agricultura, minería, caminos no pavimentados); fuentes biológicas; construcción y demolición, combustión de carbón y de aceite; brisa marina.
Vida útil	De días a semanas	De minutos a horas
Distancia del viaje	Cientos a miles de kilómetros	Menos de una decena de kilómetros

Ilustración 2- 2 Características de las partículas, adaptado de (OMS, 2000)

2.6. Evaluación de Calidad del Aire

La evaluación de la calidad del aire puede realizarse mediante mediciones, una combinación de mediciones y modelización o solamente con el uso de modelización y/o estimación de la situación, dependiendo fundamentalmente del objetivo de la evaluación, el escenario en estudio y los niveles de contaminantes en cuestión.

En función de los resultados de una evaluación de la calidad del aire, se pueden fijar criterios de gestión para lograr el mantenimiento de la calidad del aire, o su mejora cuando sea necesario, conforme a planes de actuación. Idealmente en estos planes, deben existir medidas efectivas a realizar para los episodios en que puedan ser superados los umbrales de alerta fijados.

En los casos en los que la evaluación de inmisión se evalúa realizando mediciones dirigidas, las mismas son comparadas con concentraciones de referencia, para una serie de contaminantes específicos destacados por su potencial efecto sobre la salud.

El organismo internacional reconocido como referente para fijar estos contaminantes y los valores de referencia a considerar, es la Organización Mundial de la Salud, la que ha nucleado información para establecer los “valores guía para la calidad del aire”, los cuales son considerados internacionalmente como referencia; estos valores han ido siendo más restrictivos conforme pasa el tiempo y crece el conocimiento en la materia. Los diferentes países fijan sus objetivos de calidad de aire considerando estos valores, de modo que tiendan en el tiempo a acoplarse con estos valores guía.

“Guías para la calidad del Aire, OMS”

En el año 2000 fue elaborado un documento Guía (OMS, 2000), el que tiene por objetivo proteger la salud pública de los efectos de la contaminación del aire, y minimizar la exposición de las personas a contaminantes peligrosos. Ha sido elaborado según se expresa en el documento, con el ánimo de dar una respuesta práctica a la necesidad de tomar acción respecto a la contaminación del aire en el nivel local y a la urgencia de mejorar la legislación, el manejo y la orientación en los ámbitos nacionales y regionales. El documento fue actualizado en los años 2005 (OMS, 2005) y 2021 (OMS, 2021).

Los valores numéricos presentados en estas guías, son valores de concentración de contaminantes, con niveles por debajo de los cuales la exposición de una persona durante toda la vida o por un tiempo promedio determinado, no constituye un riesgo significativo para la salud. Si estos límites son sobrepasados en el corto plazo, ello no implica que se producirán efectos adversos inmediatamente, sino que se incrementarán las posibilidades de que dichos efectos se produzcan.

2.7. Contaminantes criterio y estándares OMS

Los contaminantes criterio establecidos por la OMS son el Dióxido de Azufre (SO₂), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Ozono (O₃) y Material Particulado fino (PM₁₀, PM_{2,5}). Estos contaminantes son particularmente seleccionados en base a evidencia científica con relación a casos reportados y estudios toxicológicos, realizados a diversas concentraciones y grados de exposición de seres vivos. La OMS actualizó esta guía y publicó una nueva versión en setiembre de 2021, manteniéndose éstos como contaminantes criterio, y haciendo más restrictivos algunos valores con relación a los considerados en 2005. Se presentan en la Ilustración 2.3 a continuación, los valores establecidos por la OMS como referencia.

CONTAMINANTE	FUENTES PRINCIPALES	EFFECTOS	DIRECTRICES PARA LA SALUD 2000	DIRECTRICES PARA LA SALUD 2005	DIRECTRICES PARA LA SALUD 2021
Monóxido de Carbono (CO)	Gases de escape de vehículos motorizados; algunos procesos industriales	El CO reduce la capacidad de la sangre para llevar oxígeno y aumenta la presión del corazón y los pulmones.	10 mg/m ³ sobre 8 horas; 30 mg/m ³ sobre 1 h (30000 µg/m ³)	7 mg/m ³ en 24 h	4 mg/m ³ en 24 horas
Dióxido de Azufre (SO ₂)	Contribución menor de fuentes móviles. Generadores de calor y de electricidad que usan petróleo o carbón con azufre, plantas de ácido sulfúrico.	Irritante para los humanos; el SO ₂ , produce reacciones atmosféricas que contribuyen a la lluvia ácida.	500 µg/m ³ sobre 10 min; 20 µg/m ³ sobre 24 h.	500 µg/m ³ sobre 10 min; 20 µg/m ³ sobre 24 h	500 µg/m ³ sobre 10 min; 40 µg/m ³ sobre 24 h.
Material Particulado (PM ₁₀)	Suelo, espuma oceánica, quema de matorrales, quemas domésticas, vehículos motorizados, procesos industriales y polvo orgánico de material vegetal.	Contribuye a la bruma, aumenta el riesgo de cáncer, efectos en la mortalidad, agrava enfermedades respiratorias.	50 µg/m ³ sobre 24 h; 20 µg/m ³ media anual	50 µg/m ³ sobre 24 h; 20 µg/m ³ sobre 1 año	45 µg/m ³ sobre 24 h; 15 µg/m ³ sobre 1 año
Material Particulado (PM _{2,5})	Adicionado a algunos combustibles, el Pb es emitido desde los gases de escape de vehículos motorizados, fundiciones de plomo, plantas de fabricación de baterías.		25 µg/m ³ sobre 24 h; 10 µg/m ³ media anual.	25 µg/m ³ sobre 24 h; 10 µg/m ³ sobre 1 año.	15 µg/m ³ sobre 24 h; 5 µg/m ³ sobre 1 año
Plomo (Pb)	Adicionado a algunos combustibles, el Pb es emitido desde los gases de escape de vehículos motorizados, fundiciones de plomo, plantas de fabricación de baterías.	Afecta el desarrollo intelectual en niños; tiene muchos otros efectos adversos.	0,5 µg/m ³ sobre un año	- NO APLICA	- NO APLICA

CONTAMINANTE	FUENTES PRINCIPALES	EFFECTOS	DIRECTRICES PARA LA SALUD 2000	DIRECTRICES PARA LA SALUD 2005	DIRECTRICES PARA LA SALUD 2021
Óxidos de Nitrógeno (NO, NO ₂)	Un efecto secundario de la combustión a altas temperaturas, provocando cadenas de nitrógeno y oxígeno en los gases de escape de vehículos motorizados; generación de electricidad y calor; ácido nítrico; explosivos; plantas de fabricación de fertilizantes.	Irritante, precursor de la formación de smog fotoquímico.	200 µg/m ³ sobre 1 h para NO ₂ ; 40 µg/m ³ media anual	200 µg/m ³ sobre 1 h ; 40 µg/m ³ sobre 1 año	200 µg/m ³ sobre 1 h ; 25 µg/m ³ sobre 24 h; 10 µg/m ³ sobre 1 año
Oxidantes fotoquímicos (Principalmente Ozono (O ₃), Peroxiacetonitrato (PAN), y aldehídos)	Formados en la atmósfera por la reacción de óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y luz solar.	Un irritante, los oxidantes fotoquímicos contribuyen a la bruma, daños materiales, agrava las enfermedades respiratorias.	100 µg/m ³ sobre 8 horas	100 µg/m ³ sobre 8 horas	60 µg/m ³ sobre 8 h en temporada pico; 100 µg/m ³ sobre 8 horas.

Ilustración 2- 3 Contaminantes, efectos y Directrices OMS 2000 y 2005, adaptado de (Dietrich Schwela, 2009). (OMS, 2005) y (OMS, 2021).

En la mayoría de países del mundo, los programas de monitoreo de la calidad del aire se centran casi exclusivamente en estos contaminantes “clásicos” seleccionados. Son pocos los contaminantes fuera de estos, que se monitorean rutinariamente en forma sistemática, salvo en algunos países, ciertos ambientes laborales, o en torno a ciertos emprendimientos industriales. Algunas veces se recolectan datos sobre exposiciones personales a los contaminantes criterio y otros contaminantes del aire, pero rara vez se estandarizan protocolos para la recolección, análisis de muestras, procesamiento y almacenamiento de datos. Como consecuencia de ello, los estimados para las exposiciones personales a contaminantes, generalmente se basan en modelos altamente inciertos y en supuestos construidos dentro de dichos modelos. El contaminante Plomo, se encontraba en las Guías OMS elaboradas en el año 2000, pero fue retirado como contaminante criterio de las mismas en la actualización del año 2005.

2.8. Gestión de la Calidad del Aire y modelo conceptual adoptado

Se denomina gestión de la calidad del aire, al conjunto de medidas que se adoptan para mejorar la calidad del aire de ciertas zonas, en las que ésta pueda verse afectada de alguna manera, y asimismo las tendencias a mantener una buena calidad del aire en zonas en las que sería previsible por la evolución natural del desarrollo de las actividades realizadas, una tendencia a su deterioro.

El marco conceptual adoptado para este trabajo, promovido a nivel internacional por países como México y España, abarca según lo expuesto por Dietrich Schwela (Dietrich Schwela, 2009), las interrelaciones relevantes en la gestión de calidad del aire que se muestran en la ilustración 2.4.

El enfoque de gestión que se presenta en la ilustración 2.5., es usado con éxito en programas de gestión de calidad de aire en todo el mundo y es el enfoque de gestión recomendado por agencias que promueven el desarrollo sostenible, como la Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).

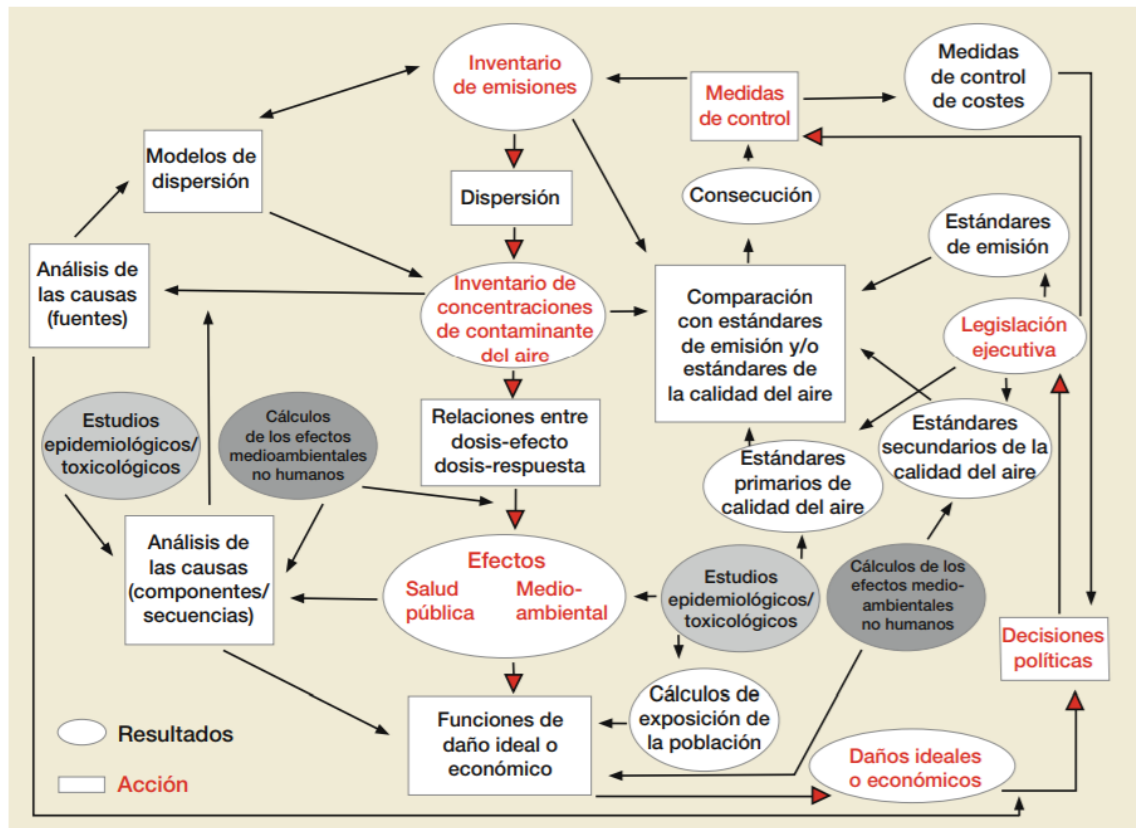


Ilustración 2- 4 Interrelaciones clave para la gestión de la calidad del aire - Extraído de (Dietrich Schwela, 2009)

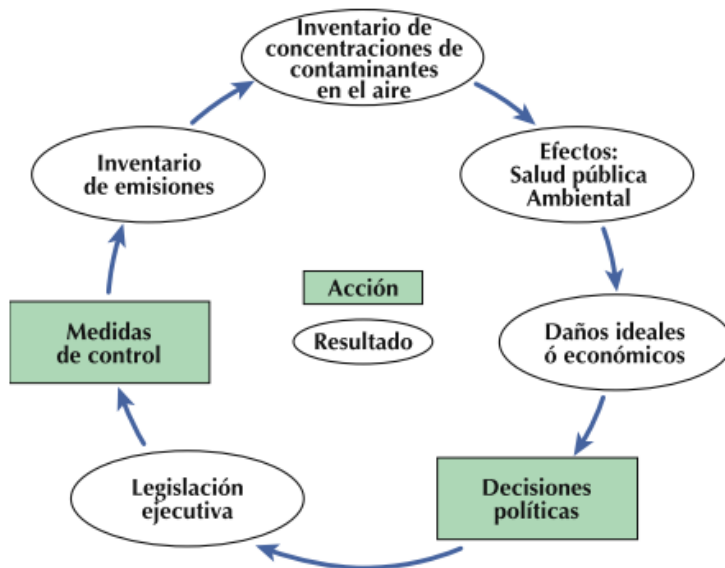


Ilustración 2- 5 Gestión de la calidad del aire –(Dietrich Schwela, 2009)

Los procesos de emisión, dispersión y concentración de inmisión de los contaminantes, forman parte de una evaluación ambiental, que no determina necesariamente el impacto final producido

sobre el ambiente. La concentración de inmisión de contaminantes va a generar efectos de diferente significancia sobre diferentes receptores, dependiendo de su nivel de exposición y sensibilidad. De este modo, luego de realizar la evaluación ambiental del escenario de estudio, es necesario acoplar esto a una evaluación económica desde el punto de vista de la salud y de los costos asociados a posibles escenarios de reducción de emisión sobre las fuentes, incorporando posibles medidas adicionales de mitigación. Se puede estimar la reducción de costos en salud que se podría obtener, considerando los posibles escenarios de reducción de emisiones, para las principales fuentes emisoras, hasta alcanzar un equilibrio.

La recomendación mundial previo a promover una medida de gestión, marca como necesario realizar un análisis del costo-beneficio de las opciones de abatimiento existentes, de modo de poder impulsar una estrategia optimizada para la mitigación del impacto indeseado, con la finalidad de que la medida pueda ser viable y sostenible en el tiempo (Larssen et al., 2015).

2.9. Estándares, valores y tendencias de la contaminación del aire:

La visión global sobre la concentración de los compuestos “clásicos” en calidad de aire, es que las concentraciones de SO₂ y de MP están disminuyendo en los países desarrollados y en desarrollo, mientras que las concentraciones de NO_x y O₃ son constantes o están en aumento, como consecuencia del incremento del parque vehicular. No obstante lo anterior en muchos países en desarrollo, las concentraciones de SO₂ y MP están aumentando debido al incremento de la combustión, tal como lo están haciendo el NO_x y el O₃ provenientes de los vehículos motorizados y de las emisiones de COV generadas tanto por estos como por fuentes industriales, ya que son precursores del O₃.

En la ilustración 2.6., se presenta una adaptación elaborada a partir de datos de la base de datos de contaminación atmosférica, reportados por varios países a la OMS. En ella se puede contar con un panorama global sobre las tendencias del comportamiento del Material Particulado en el mundo, en base a las comparaciones existentes publicados por la OMS (World Health Organization, 2016):

Número de ciudades incluidas en las comparaciones de PM 2,5 y PM10 realizadas en períodos de 5 años, por región (Adaptado de OMS)				
Región	Cantidad de pueblos y ciudades	Numero de países	** Tendencia sobre el período 2008-2013	Rango aproximado de concentraciones promedio anual reportadas por ciudades de la región en µg/m3, período 2010 - 2016 ****
Africa Sub-sahariana *	2	2	-	55 - 175
América (países con bajos y medios ingresos)	13	7		25 - 50
América (países con altos ingresos)	343	6		25 - 75
Mediterráneo Este (ingresos bajos y medios)	16	6		75 - 300
Mediterráneo Este (ingresos altos)	6	2		150 - 275
Europa (ingresos bajos y medios)	32	5		20 - 45
Europa (ingresos altos)	277	30		15 - 35
Sur este de Asia	53	5		35 - 300
Pacífico oriental (bajos y medios ingresos)	33	2		25 - 125
Pacífico Oriental (ingresos altos)	21	3		10 - 35
Mundo	796	68	***	-
* Región con menos de 5 ciudades no se incluyeron en el análisis, debido a la falta de representatividad				
** La "tendencia" se realizo para ciudades con mediciones de PM2,5 o PM10 durante 3 o 4 años.				
	No más de 5% de cambio durante el período de 5 años			
	Más del 5% de decrecimiento durante el período de 5 años			
	Más del 5% de incremento, durante el perío de 5 años			
*** La tendencia global, se basa en el peso proporcional de la población urbana. Los resultados se basaron en 795 ciudades, y deberían interpretarse con cuidado, dado que: las ciudades podrían no ser lo suficientemente representativas, las variaciones anuales debidas por ejemplo al cambio climático pueden ser importantes y la comparación de 5 años puede no representar una tendencia, particularmente cuando los cambios son limitados.				
**** Ciudades de la región con poblaciones entre 1,929,000 y 29,000,000				

Ilustración 2- 6 Tendencias sobre la contaminación por partículas, adaptado de (World Health Organization, 2016)

Lo anterior, puede complementarse con la ilustración 2.7., que contiene un rango de concentraciones promedio anual para calidad de aire, para los restantes contaminantes criterio, según datos publicados por la OMS en 2005:

Región	Promedios anuales $\mu\text{g}/\text{m}^3$		Máxima concentración horaria $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	NO ₂	SO ₂	Ozono
África	35-65	10-100	120-300
Asia	20-75	6-65	100-250
Australia y Nueva Zelanda	11-28	3-17	120-310
Canadá y Estados Unidos	35-70	9-35	150-380
Europa	18-57	8-36	150-350
América del sur	30-82	40-70	200-600

Ilustración 2- 7 Concentraciones típicas de contaminantes, adaptado de (OMS, 2005)

Destacan de esta ilustración África y América, para los contaminante Dióxido de Azufre y Ozono, ya que se presenta un rango con valores superiores muy elevados, considerando los valores de las directrices, presentados en la ilustración 2.3.

3. Gestión de la Calidad del Aire en Uruguay

En este capítulo se presenta un relevamiento cronológico, de hitos de importancia relacionados con la Gestión de la Calidad del Aire en nuestro país, y se mencionan los principales actores identificados.

3.1. Reseña histórica de hitos relacionados con la Gestión de la Calidad del Aire en Uruguay

El primer estudio de calidad de aire encontrado en el país, se habría realizado en el marco de un estudio de la OPS en la década del '70, cuyos resultados fueron difundidos a través del primer Informe de la Red PANAIRES (OPS, 1976), en el cual Montevideo aparece entre las 50 ciudades estudiadas, pero es un país con centros urbanos de baja población comparativamente. En ese entonces, los contaminantes monitoreados fueron PTS, PM₁₀, NO_x y SO₂. No se generaron programas específicos de trabajo a partir de este estudio, como si se encaminaron con otros países de la región, por ejemplo Chile y Colombia.

Desde el punto de vista legislativo, en 1997 se dio un importante avance al introducir a la protección del ambiente como de "Interés General" en el Art. 47 de la Constitución. Ese mismo año, se creó el 1er Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero "INGEI" presentado en la Conferencia de las partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático "CMNUCC", con año base 1990.

En 1999, se promulgó el Decreto 135/99 (modificado posteriormente por el Decreto 589/009), en el cual se reglamentó la gestión de los residuos sólidos hospitalarios, lo cual exigió importantes mejoras en las instalaciones de incineración de estos residuos, estableciéndose límites máximos para sus emisiones al aire.

En el año 2000, con la aprobación de la Ley General de Protección al Ambiente, se dio otro importante avance vinculado con la calidad del aire, dada la redacción de los siguientes artículos de dicha Ley:

- *Artículo 19. (Declaración).- Declárase de interés general, de conformidad con lo establecido en el artículo 47 de la Constitución de la República: A) la protección del ambiente, de la calidad del aire, del agua, del suelo y del paisaje (...)*
- *Artículo 17. (Calidad del aire).- Queda prohibido liberar o emitir a la atmósfera, directa o indirectamente, sustancias, materiales o energía, por encima de los límites máximos o en contravención de las condiciones que establezca el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente.*

En el año 2001, se generó la primera propuesta de estándares de calidad de aire y fuentes móviles en el marco del grupo GESTA Aire convocado por la COTAMA, en la cual se propusieron los contaminantes criterio a considerar para el país.

Ese mismo año, se dio a conocer resultados de plomemias elevadas, sobre todo en niños en determinadas zonas de Montevideo, que alertaban sobre una contaminación con Plomo. En este marco el gobierno realizó varios estudios y tomó diversas medidas con relación a las posibles fuentes de contaminación que contribuían con la liberación de este metal al ambiente, y en el año 2003, se determinó por el Juzgado Letrado que participó de la evaluación de la situación, la prohibición del uso de aditivos antidetonantes con plomo en las gasolinas vendidas por ANCAP, lo cual impactó directamente sobre las emisiones al aire de este contaminante, que se generaban en forma distribuida por el parque vehicular, formando parte del material particulado que se depositaba en los suelos.

En 2005, se promulgó el Decreto 349/05, de Autorizaciones Ambientales, en cuyo marco se proyectan Evaluaciones de Impacto Ambiental, considerando los diferentes componentes del ambiente, y entre ellos los potencialmente generados por las emisiones y calidad del aire.

En este mismo año se creó la Red de Calidad de Aire de la Intendencia de Montevideo y DINACEA (entonces DINAMA), la cual contaba en ese momento con siete estaciones de monitoreo. Ese año se realizó una revisión de la propuesta de estándares de calidad de aire, por el grupo GESTA Aire.

En 2008, se aprobó el Decreto 111/008, en el cual se establece que los vehículos pesados y semipesados de transporte de carga y pasajeros que se importan al país (>5000 kg de capacidad), deben cumplir con las normas de emisión Euro III, y que las empresas fabricantes o sus representantes debían presentar una serie de información relativa a los motores para la obtención de permisos y certificados necesarios por parte del MTOP.

En el año 2008, fue también aprobada multipartidariamente, la Política Energética del MIEM 2005 – 2030, en la cual se estableció como parte del objetivo, la importancia de que las acciones impulsadas por esta política sean sostenibles tanto desde el punto de vista tanto económico como ambiental.

En el año 2009, se actualizaron los estándares relativos a la gestión de los residuos sólidos hospitalarios.

El Plan de Movilidad de la Intendencia de Montevideo, aprobado en el año 2010, establece explícitamente la necesidad de mantener una buena calidad de aire en la ciudad. En 2010 también se elaboró en el marco de un convenio entre el Ministerio de Ambiente (entonces MVOTMA) y Udelar, el primer inventario de emisiones, el que consideró como año base el año 2006.

En el 2012, se elaboró la primer propuesta de estándares de emisión de fuentes fijas, y se actualizaron las propuestas de estándares de calidad de aire y de emisiones vehiculares, por parte del grupo GESTA Aire.

En el año 2014 se instaló la planta desulfuradora de ANCAP y se retiraron de servicio las unidades 5ta y 6ta de la Central “José Batlle y Ordóñez” de UTE, que operaban para generación térmica de energía eléctrica en base a fueloil.

En el año 2015, se actualizaron las propuestas de estándares de emisión de fuentes fijas, y se establecieron los primeros valores objetivo de calidad de aire, con plazos escalonados para su implementación.

En 2017, se aprobó la Política Nacional de Cambio Climático (SNRCC, 2017) y se presentó la primer Contribución Determinada a Nivel Nacional (CND). En estos documentos se establece el marco estratégico para guiar las transformaciones recomendadas, para hacer frente a los desafíos del Cambio Climático y la variabilidad, tanto para la adaptación como la mitigación a nivel nacional y subnacional. Pretende además, atender las obligaciones internacionales que emergen de la ratificación del Acuerdo de París, previendo medidas en el corto, mediano y largo plazo, con la participación de distintos actores de la sociedad uruguaya, con un horizonte hacia el año 2050.

A principios del año 2019, se aprobó el Plan Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible (PNADS), y a mediados de ese año, Uruguay pasó a formar parte de la Coalición para el Clima y la Calidad del Aire.

En 2020, se elaboró la primer propuesta de reglamento de calidad de aire, que nuclea aspectos vinculados con la calidad aire, con las emisiones de fuentes fijas y móviles, la que se publicó en el Observatorio Nacional Ambiental (OAN)⁵.

En 2020, se crearon el Ministerio de Ambiente, la Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental, y la Dirección Nacional de Cambio Climático, Direcciones que han tomado roles preponderantes en los asuntos vinculados con las políticas de gestión, que pueden relacionarse con la calidad del aire y emisiones atmosféricas.

En 2020, se lanzó la campaña interinstitucional “Mejor leña al fuego”, en conjunto entre el Ministerio de Ambiente, los ministerios de Industria, Energía y Minería (MIEM); Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP); y las intendencias de Canelones y Montevideo.

En 2021, se realizó la primer edición del Manual “Mejor leña al fuego”, publicación que ofrece a los usuarios de leña consejos prácticos sobre su uso en estufas y calderas, a fin de optimizar su eficiencia y minimizar las emisiones producto de combustión.

El 04/05/2021, se promulgó el Decreto 135/2021, que toma la última propuesta de estándares y reglamenta la calidad del aire en Uruguay, estableciendo un nuevo instrumento de gestión ambiental para determinadas actividades, que quedan sujetas a obtener la “Autorización de Emisión” para poder operar.

Con relación al esquema internacional de GCA, y el relevamiento expuesto en el punto 3.1 anterior, se identificaron diversos actores y componentes que participan en la dinámica actual del país con relación a un posible marco para la gestión integral de la calidad del aire, los cuales refuerzan sus interacciones y las retroalimentan cada vez más, con mayor claridad de roles.

El país cuenta con diversos niveles de experiencia adquirida por diferentes entidades en materia de: inventarios de emisiones, análisis de causas de situaciones, modelados de dispersión, estándares primarios de calidad de aire, estándares de emisión, comparación con estándares de emisión y/o estándares de calidad de aire, medidas de control, estudios epidemiológicos/toxicológicos, y legislación general en la materia.

Se entiende que se debería continuar trabajando para integrar estos impulsos de manera coordinada y sostenida, para lo cual aún hacen falta decisiones políticas, solidez técnica, y mayor coordinación de las acciones e información generada por las diversas instituciones y actores involucrados. Con el objetivo de propender al modelo de gestión de la Ilustración 1.4, aún hace falta afianzar y difundir los aspectos técnicos ya aplicados en casos particulares, así como desarrollar también espacios para incluir los siguientes componentes al marco conceptual existente según (Dietrich Schwela, 2009): medidas de control de costos, definición de daños ideales o económicos, Inventarios de concentración de contaminantes del aire, análisis de causas, cálculos de los efectos ambientales no humanos, relaciones entre dosis-efecto y dosis-respuesta, estándares secundarios de la calidad del aire y cálculos de exposición de la población.

Entre 2020 y 2021, la GCA en nuestro país ha tenido un empuje muy importante desde el nuevo Ministerio de Ambiente, mostrándose el liderazgo esperable de esta nueva institución en la materia, principalmente desde sus Direcciones Nacionales de Calidad y Evaluación Ambiental y de Cambio

⁵ <https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/propuesta-tecnica-aire.pdf> – consultado junio 2021

Climático, que están trabajando internamente para desarrollar el abordaje del factor aire en los próximos años, enviando mensajes claros como la promulgación de Decretos y preparación de planes estratégicos a implementar en los próximos años.

3.2. Evolución de contaminantes criterio en Uruguay

Evolución de contaminantes, redes de monitoreo de la Intendencia de Montevideo y DINACEA:

Uruguay cuenta en general con una buena calidad de aire. Las situaciones más críticas se encuentran en el Área Metropolitana, Nueva Palmira (Colonia) y Río Branco (Cerro Largo). En el Área Metropolitana, se debe principalmente a contaminación urbana de diversos orígenes y en las otras dos ciudades, se asocia principalmente al desarrollo de agroindustrias locales y al tipo de caminería (MVOTMA-SNA, 2019).

Se tienen estudios de evaluación de calidad de aire realizados en diversos puntos del país, con informes oficiales realizados a nivel nacional para las localidades de: Montevideo, Ciudad del Plata, Minas, Río Branco, Nueva Palmira, Fray Bentos, Las Cañas, Aceguá, Melo y La Paloma (publicados en página web del OAN).

La Intendencia de Montevideo es la institución que concentra y comunica a la población, en forma sistemática, la mayor cantidad de información asociada a calidad de aire; elabora informes periódicos, semanales y anuales, que se publican en la página web de dicha institución. A continuación se presentan los resultados generados para el año 2017 en Montevideo, lo cual ejemplifica geográficamente uno de los escenarios más presionados en materia de calidad de aire, debido a la alta densidad de actividades emisoras. Del total de muestras analizadas para los años 2017 y 2018 (Ilustraciones 2.1 y 2.2 respectivamente), se puede concluir que los parámetros en los que se registró alguna superación, fueron PM_{2,5}, NO₂ y TRS. Las superaciones fueron muy escasas, y se dieron con relación a promedios de corta duración, como puede apreciarse en las ilustraciones 3.1 y 3.2 a continuación. No se han registrado superaciones para los estándares anuales.

Categorías ICAIRE	PTS	PM10 man	PM10 Auto	PM2.5	HN	SO2	NO2	CO	O3	TRS
Muy Bueno	23	79	1274	864	107	1451	978	1405	106	251
Bueno	7	3	15	61	3	15	503	0	93	47
Aceptable	0	3	2	15	1	1	172	0	5	16
Inadecuada	0	0	0	17	0	0	1	0	0	2
Mala	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0
Muy Mala	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ND	1	8	170	131	13	118	538	56	161	49
TOTAL	31	93	1461	1095	124	1585	2192	1461	365	365

Ilustración 3- 1 Índice de calidad de aire, departamento de Montevideo (IDM, De Nigris, & Franco, 2017)

OTAL 2018									
Categoría	PTS	PM10	PM10Man	PM2.5	HumoNegro	CO	SO2	NO2	O3
Muy Buena	27	1436	166	1538	112	1456	1643	1099	406
Buena	1	12	6	64	0	0	7	772	39
Aceptable	0	2	3	28	0	0	0	269	8
Inadecuada	0	0	0	14	0	0	0	7	0
Malá	0	0	0	6	0	0	0	0	0
No Determinada	2	10	11	175	8	4	175	773	277
TOTAL	30	1460	186	1825	120	1460	1825	2920	730

Ilustración 3- 2 Índice de calidad de aire, departamento de Montevideo (IDM, De Nigris, & Franco, 2018)

El índice de ICAIRE, se calcula en base a lo expuesto en pautas publicadas por la Intendencia de Montevideo⁶ (IdM, 2010), pero una calidad del aire aceptable, buena y muy buena, indican que se cumple con los estándares de calidad de aire fijados por la OMS.

Según estudios realizados por el IMFIA, a partir de los datos de Calidad de Aire obtenidos por las estaciones de medición situadas en Montevideo, entre 2009 y fines de 2012, se puede destacar lo siguiente, vinculado con los eventos registrados sobre la calidad del aire (UdelaR, 2014):

“En todas las estaciones de medición se identificó la ocurrencia de eventos, durante los cuales el valor medio diario de la concentración de partículas superó el valor de referencia. Estos eventos de superación presentaron las siguientes características:

- *Ocurren durante el invierno.*
- *Tienen una fuerte correlación entre las evoluciones temporales de la concentración de partículas obtenidas en todas las estaciones.*
- *La concentración elevada se presenta durante períodos de tiempo en los cuales se alcanzan temperaturas por debajo de 10 °C.*
- *A lo largo de los períodos de tiempo en que se tienen elevadas concentraciones de partículas en el aire, la velocidad del viento presenta valores inferiores a 3 m/s y la altura de la capa de mezcla valores inferiores a 10 m (2014).”*

En otro estudio posterior, realizado con datos de calidad de aire del período 2012-2017 (UdelaR - DINAMA/ 2017, n.d.), se presentaron además las siguientes observaciones:

- *Entre los días 140 y 200 del año se tendría la mayor proporción de eventos de baja velocidad de viento, la menor radiación y además la menor altura de la capa de mezcla. Esto indicaría que sería una estación con elevada probabilidad de que se presenten situaciones de elevada concentración de contaminantes.*
- *La evolución del valor de la mediana de las pendientes en la concentración de partículas, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno en función del tiempo, pasa de valores claramente negativos en los primeros años (en torno a 2012), a valores que han tendido a ser positivos en 2017. En el caso del monóxido de carbono esta evolución no se aprecia con claridad.*
- *Se analizó la cantidad de eventos en que la concentración de cada contaminante medido en cada estación superaba un valor de referencia dado. Se observó que, a lo largo de los años, para SO₂ y partículas esta cantidad se redujo, para el CO se mantuvo, en tanto que para los óxidos de nitrógeno tendieron a incrementarse.*

⁶ https://montevideo.gub.uy/sites/default/files/biblioteca/icaire2010_0.pdf - visto marzo 2021

- *Los niveles de concentración de SO₂ y de CO resultan sensiblemente por debajo de los valores de referencia, motivo por el cual su seguimiento sería conveniente realizarlo a los efectos de deducir índices o indicadores de la calidad del aire o bien en los alrededores de emisores puntuales de significación como ser la refinería de petróleo o centrales térmicas de generación de energía eléctrica.*
- *Respecto al análisis de la evolución de la concentración de partículas en el aire, se destaca que fueron utilizados los valores de referencia recomendados en DINAMA, 2015 considerados en ese momento para el año 2020 y 2024. La proporción de eventos en que se supera el valor de referencia que entraría en vigencia en 2024 sería del orden del doble de la proporción de eventos que superarían los valores de referencia que entrarían en vigencia en 2020. Este resultado alertaría sobre la posibilidad que se tenga un importante incremento en la proporción de eventos que superen los valores de referencia en la medida que se registren incrementos en las concentraciones y una reducción en los valores de referencia.*

Por otro lado, de la climatología en la ciudad de Montevideo y en base a lo reportado por los estudios realizados por el IMFIA, se pueden resumir los siguientes hallazgos:

- *Dirección de viento más probable: NORESTE (23 %) y SUR (10 %).*
- *Velocidad media del viento entre 2,7 m/s y 4,8 m/s.*
- *La atmósfera permanece FUERTEMENTE ESTABLE o con INVERSIÓN del orden del 30 % del tiempo. En la estación de La Teja se constató INVERSIÓN, del orden del 10 % del tiempo.*
- *La altura de la capa de mezcla en un 53 % del tiempo presenta un valor mayor a 600 m, mientras que en un 4 % del tiempo es inferior a 10 m.*
- *En el análisis de comportamiento diario, se tiene que durante el horario nocturno, la altura de la capa de mezcla presenta los valores más bajos, siendo estos inferiores a 600 m.*

3.3. Valores de referencia para calidad de aire adecuada, en Uruguay

Los valores de referencia considerados para la calidad de aire, son concentraciones de contaminantes que tienen el objetivo de prevenir deterioros en la salud de la población (estándares primarios). Éstos se comparan con las concentraciones de inmisión resultado de simulaciones (en caso de emprendimientos nuevos, o de estar validando/calibrando un modelo determinado); o bien con las concentraciones medidas in situ en caso de contar con mediciones de campo.

Los valores objetivos de calidad de aire vigentes, a nivel nacional, son los que se presentan en la Ilustración 3.3 a continuación:

Tabla 1. Objetivos de calidad del aire			
Aplicables desde la publicación de este reglamento y hasta el 31 de diciembre de 2023			
Parámetro	Período ⁽¹⁾	Concentración ⁽²⁾ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tolerancia ⁽³⁾ No se podrá exceder:
CO	1 hora	30000	- - -
	Máxima diaria ⁽⁴⁾	10000	- - -
NO₂	1 hora	200	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 18 horas al año
	1 año	40	- - -
O₃	Máxima diaria ⁽⁴⁾	100	160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 25 días en promedios de 3 años
SO₂	1 hora	300	450 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 horas en el año
	24 horas	50	125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 3 días en el año
PM2.5	24 horas	35	54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 30 días al año
	1 año	25	- - -
PM10	24 horas	75	112 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 15 días al año
	1 año	30	- - -
Pb	1 año	0.5	- - -
Azufres Reducidos Totales	30 minutos	10	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta 40 veces en el año en promedios de 30 minutos
	24 horas	7	11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta 10 días en el año

Ilustración 3-3 Valores objetivo de calidad de aire en Uruguay. Fuente: Decreto 135/021 del 04 de mayo de 2021.

3.4. Estándares de emisión

Los estándares de emisión aplicables a nivel nacional, también están expuestos en el Decreto 135/021.

El documento presenta estándares de emisión para 7 rubros y para "Otros emisores": Generadores de energía; Fabricación de Clinker, Cal y co-procesamiento en hornos de clinker; Fabricación de Pasta de Celulosa y Papel; Producción de Ácido Sulfúrico y Fertilizantes; Fundición de Metales y Acería; Incineradores de Residuos; y Otros Emisores.

Estos valores límite máximo de emisión, son los que se comparan en caso de proyectos, con las previsiones de emisión provistas por el fabricante de los equipamientos industriales en condiciones determinadas de operación y mantenimiento, estimados en la mayor parte de los casos en base a factores de emisión que dependen de los sistemas de mitigación instalados, y acorde a los documentos de Mejores Técnicas Disponibles a nivel internacional.

Durante la fase operativa, los estándares de emisión pueden monitorearse directamente en boca de chimenea, por medio de monitoreos discretos y continuos, a los efectos de su control.

En caso de fuentes móviles, los niveles de emisión se asocian al tipo de tecnología de mitigación de la maquinaria y las características del combustible utilizado.

3.5. Comparación de valores con estándares de emisión y calidad

Para poder realizar la comparación de mediciones con los valores de referencia, es importante considerar el tipo de monitoreo, las condiciones durante el cual se realiza, la frecuencia y duración de la medición, de modo de comparar contra los valores adecuados (horarios, octo-horarios, diarios, anuales).

Asimismo, las metodologías de determinación utilizadas, deben permitir trazabilidad y confianza.

Respecto a los emisores industriales, diversas empresas emisoras tienen instalados sistemas de medición continua de contaminantes en sus emisiones al aire, acorde a las frecuencias de medición y requerimientos particulares previstos en su Autorización Ambiental respectiva. En algunos casos, estas mediciones son reportadas al Ministerio de Ambiente cada 10 minutos, semestral o anualmente.

El monitoreo continuo de emisiones, se realiza con equipamientos instalados en la boca de la chimenea, o bien, mediante un sistema de extracción controlado para el muestreo y medición de la emisión. Los monitoreos discretos, utilizan sistemas de extracción de muestra particulares, y luego se tiene una segunda etapa de análisis posterior, en laboratorios ambientales.

También hay empresas que tienen equipamientos de monitoreo continuo de calidad de aire instalados en diversos puntos del país, debiendo reportar evaluaciones periódicas al Ministerio de Ambiente. Para algunas estaciones de calidad de aire, los datos del monitoreo continuo son transmitidos y publicados a través del Observatorio Ambiental Nacional.

Hay importadores y fabricantes de estos equipamientos de monitoreo en el país, que además de proveer equipos certificados, ofrecen servicios de instalación, calibración y mantenimiento, en base a normativas internacionalmente aceptadas.

En el país hay laboratorios que ofrecen servicios de medición discreta de emisiones de fuentes fijas y por períodos variables para calidad de aire con estaciones de monitoreo, conjuntamente con parámetros meteorológicos, en base a técnicas de muestreo y medición internacionalmente aceptadas.

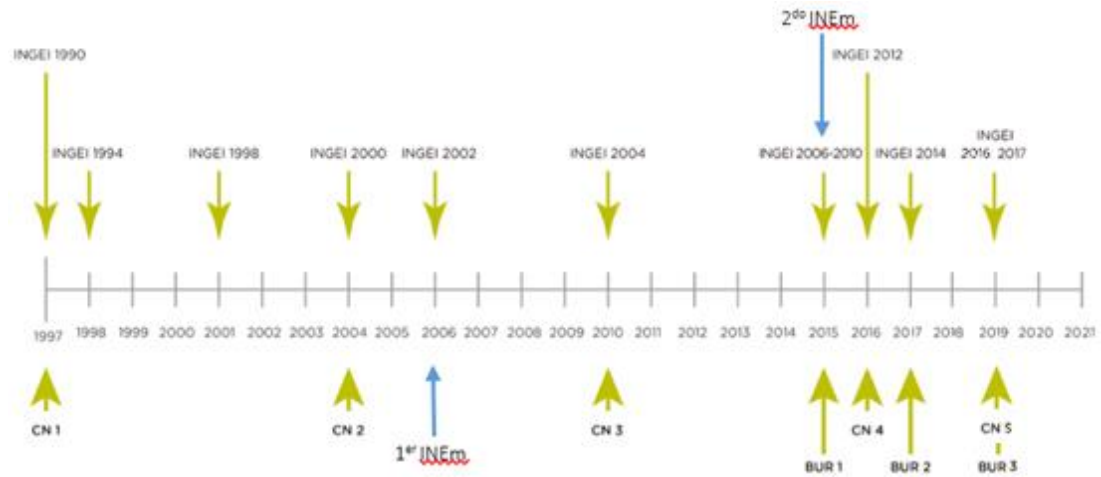
Para las fuentes móviles, la Dirección Nacional de Transporte (DNT), del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) otorga certificados, registros y habilitaciones para la importación de vehículos de pasajeros y carga, acorde a lo establecido por el Decreto 111/008. La DNT, realiza lo anterior, tomando como referencia los certificados de emisiones proporcionados por los fabricantes de estos motores.

Por otro lado, la empresa Applus automotive, actual concesionaria del MTO para las Inspecciones Técnicas Vehiculares, realiza chequeos de emisión de humos, con la utilización de aparatos que pueden medir opacidad, y tienen umbrales internos preestablecidos de aceptación. Por el momento y acorde a las pautas establecidas por el MTO, esta empresa no está monitoreando explícitamente la emisión de gases (SO₂, NO_x) o material particulado durante la vida útil de la generalidad de los vehículos en circulación, ni durante la operativa de los vehículos cuyo ingreso fuese inicialmente autorizado.

El aunar criterios con relación a las metodologías de medición utilizadas por los proveedores de estos servicios y desarrollar en el país la capacidad para medir la emisión de contaminantes criterio provenientes de las fuentes vehiculares forma parte de los pasos a seguir en este sentido. Según el Decreto 135/021, el Ministerio de Ambiente establecerá criterios, guías e instructivos técnicos, asociados al aseguramiento de la calidad de los datos obtenidos en las mediciones de emisión y calidad de aire.

3.6. Evolución de emisiones en Uruguay

Para realizar este análisis se recabó la información a partir de los Inventarios Nacionales de Emisiones atmosféricas y gases de efecto invernadero existentes, siendo el último Inventario de Gases de Efecto Invernadero realizado con año base 2017⁽⁷⁾ y el Inventario Nacional de Emisiones con año base 2015⁽⁸⁾. Se presenta en la ilustración 3.4 a continuación, un esquema cronológico, que indica los distintos inventarios e informes asociados.



INEm: Inventario Nacional de Emisiones (IMFIA); INGEI: Inventario Nacional de GEI (SNRCC); CN: Comunicación Nacional; BUR: Informe Bienal de Actualización;

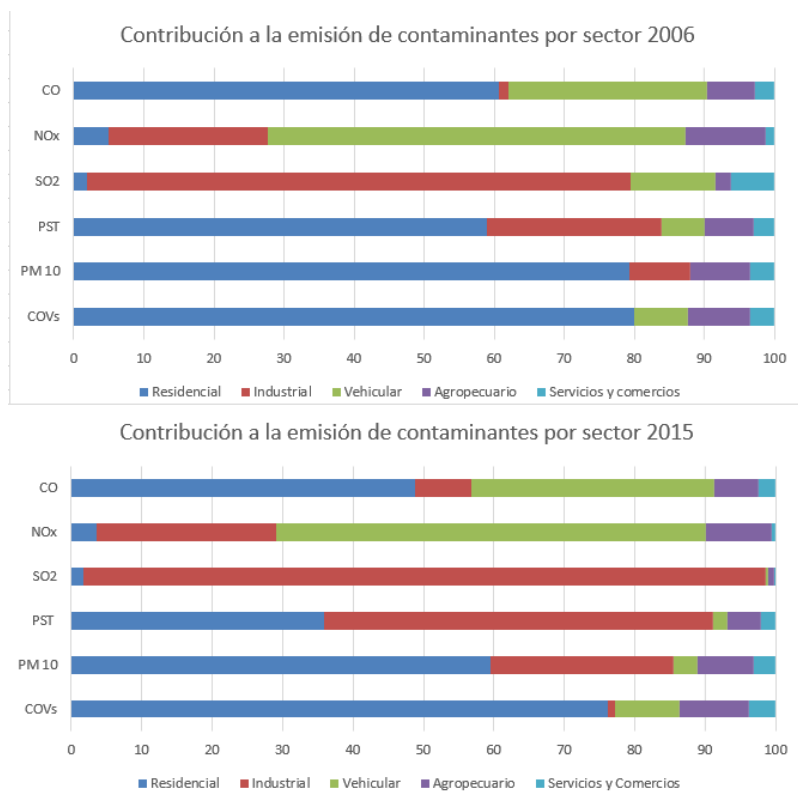
Ilustración 3- 4 Cronograma de información nacional de inventarios, y reportes internacionales de emisiones de Gases de Efecto Invernadero, adaptado de sitio web oficial del Ministerio de Ambiente.

Evolución de la emisión de contaminantes - Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015 vs 2006

Se presenta a continuación, una serie de gráficos elaborados a partir del inventario de emisiones correspondiente al año base 2006, y las planillas de datos correspondientes al año 2015. Estos inventarios se realizaron en el marco del convenio MVOTMA - UdelaR (IMFIA), en base a factores de emisión EPA-42 y el nivel de actividad de los procesos de las industrias registradas en DINAMA, a cuyos datos y planillas se tuvo pleno acceso, avalado en el marco de una solicitud de acceso a la información pública tramitada oportunamente. La Ilustración 3.5. presenta porcentajes de contribución por sector a la emisión nacional de PM10, PTS, SO₂, NO_x, CO y COV.

⁷ <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/2020-08/Inventario%20Nacional%20Emisiones%20GEI%202017%20%282019%29.pdf> consultado marzo 2021

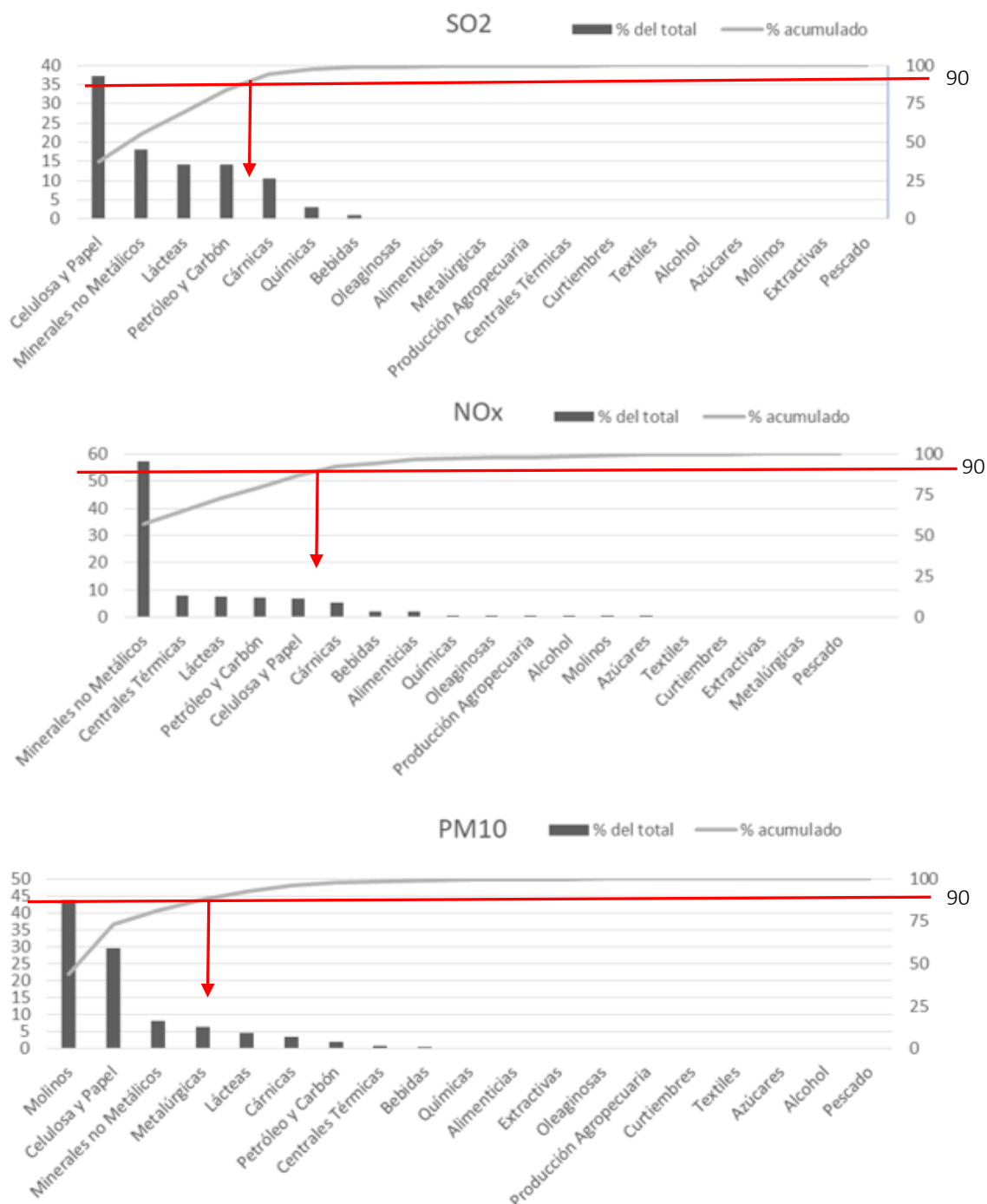
⁸ https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/Inventario_de_Emisiones_Atmosfericas_2015.pdf mar2021



Elaboración propia

Ilustración 3- 5 Contribución a la emisión de contaminantes por sector 2006 vs 2015.

Con relación al aporte industrial, y sus principales contribuciones (SO₂, PTS, NO_x y PM₁₀), el mismo se puede desglosar por rubros, como se muestra en la Ilustración 3.6, a continuación:



En rojo se señala el valor 90 % en el eje de emisiones acumuladas. Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 3- 6 "Distribución de aportes por rubro, a partir del Inventario de Emisiones".

Se estimó el aporte porcentual de la emisión de los siguientes contaminantes atmosféricos: SO_x, NO_x, PST, PM₁₀, CO y COV. El contaminante que presenta mayor emisión es el PM₁₀ (76,6 %) y el PST (16,8 %). En este sentido, se destaca el aporte de la erosión eólica y la de rodadura (66,9 y 25,8 % respectivamente). Con relación al año 2006, se observa un incremento en un 20 % de las emisiones totales, lo cual no se correlaciona con el incremento de un 80 % que se dio en términos del aumento

del consumo de energía. El CO es el contaminante que presenta mayores emisiones (40,6 %), seguido por los COV (26,4 %). La distribución porcentual en términos cualitativos para los distintos contaminantes, parece haberse mantenido entre 2006 y 2015. Las mayores emisiones de SO_x y PTS calculadas, se generan en el sector industrial. Los rubros principales para estas emisiones, son Celulosa y Papel, Minerales no metálicos, Lácteas, Petróleo y carbón, y Molinos. En el inventario de 2006, el mayor emisor de estas partículas (PST) era el sector residencial, mientras que en 2015, lo es el rubro industrial.

En el inventario correspondiente al año 2015 el sector residencial es el mayor responsable de las emisiones nacionales de PM₁₀, CO y COV (Cataldo et al., 2019). Estas emisiones se deben fundamentalmente al consumo de leña. Las mayores emisiones de NO_x, son generadas por el rubro vehicular, mayoritariamente vinculadas con las emisiones de camiones a gasoil y autos. Esto se mantiene, con relación a lo observado en 2006.

La ilustración 3.7, presenta la correlación entre los códigos de la Estructura CIU 4 (Clasificación Internacional Industrial Uniforme Rev 4 para Uruguay – INE 2019)⁹, y los rubros considerados en el último inventario nacional de emisiones atmosféricas, a partir de lo cual se pueden establecer los aportes porcentuales para las emisiones de los distintos rubros. La misma, puede ser utilizada como guía para la consideración de diferentes medidas de gestión posibles, en caso de necesitar priorizar las acciones con relación a las emisiones del sector industrial, por rubros, en nuestro país.

En los próximos capítulos, el trabajo se centrará en las emisiones de Óxidos de Nitrógeno, por ser el contaminante elegido para el abordaje de esta tesis.

Rubro "Industria" del Inventario IMFIA	CIU Rev4	PM 10 (%)	PST (%)	SO _x (%)	NO _x (%)	CO (%)	COVs (%)
Molinos	1061, 5210, 1080	44	26	0	0	1	0
Celulosa y Papel	1701, 1702, 1709	30	50	36	7	71	1
Minerales no Metálicos	2391, 2392, 2393, 2394, 2395, 2399,	8	5	17	57	13	0
Metalúrgicas	2430, 2410, 2511, 2512, 2513, 2520, 2591, 2592, 2593, 2599	6	2	0	0	0	0
Lácteas	1050	5	5	14	8	3	1
Cárnicas	1011, 1012, 1013	4	2	10	5	2	1
Petróleo y Carbón	1920, 5210	2	2	14	7	0	0
Centrales Térmicas	3510	1	4	5	8	5	2
Bebidas	1102, 1103, 1104	0	1	1	2	1	6
Químicas	1811, 2011, 2012, 2013, 2021, 2022, 2023, 2029, 2100, 2211, 2220	0	1	3	1	0	87
Alimenticias	1030, 1079, 1200	0	0	0	2	1	0
Extractivas	Sección B y F	0	0	0	0	0	0
Oleaginosas	1040	0	1	0	1	1	0

⁹ <https://www.ine.gub.uy/clasificador-internacional-industrial-uniforme-ciu-> consultado marzo 2021

Producción Agropecuaria	A 01 a 09	0	0	0	1	0	0
Curtiembres	1511	0	0	0	0	0	0
Textiles	1311, 1312, 1313, 1393	0	0	0	0	0	0
Azúcares	1072	0	1	0	0	1	0
Alcohol	1101	0	1	0	1	1	0
Pescado	1020	0	0	0	0	0	0

Elaboración propia, se resaltaron los sectores con mayores emisiones de NO_x.

Ilustración 3- 7 Rubros del sector industrial y Codificación CIU 4.

4. Óxidos de Nitrógeno

4.1. Óxidos de nitrógeno

Cuando se habla de NO_x , se hace referencia a una familia de seis compuestos. La mezcla incluye al óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de dinitrógeno (N_2O_2), trióxido de nitrógeno (N_2O_3), tetróxido de nitrógeno (N_2O_4) y pentóxido de nitrógeno (N_2O_5). El Nitruro de Oxígeno (N_2O), conocido también como el gas de la risa, tiene un comportamiento toxicológico diferente al de los óxidos de nitrógeno y no entra dentro de esta categoría denominada Óxidos de Nitrógeno (NO_x). No obstante el nitruro de oxígeno es un compuesto de nitrógeno muy estable en la atmósfera, y tiene un potente efecto de invernadero. Se produce en abundancia por procesos biogénicos a partir de diferentes usos del suelo, y es uno de los principales GEI cuantificados en los inventarios de este tipo.

Cuando cualquiera de estos óxidos de nitrógeno se disuelve en agua, forman ácidos nítrico (HNO_3) o nitroso (HNO_2). Los NO_x y sus derivados, existen y reaccionan como gases en el aire, como ácidos en las gotas de agua, o como sales depositadas, contribuyendo a los efectos de la contaminación por "lluvia ácida".

El monóxido de nitrógeno y el dióxido de nitrógeno son los óxidos más importantes toxicológicamente; ninguno de ellos es inflamable. El monóxido de nitrógeno es, a temperatura ambiente, un gas de olor dulce penetrante, fácilmente oxidable a dióxido de nitrógeno, mientras que el dióxido de nitrógeno tiene un olor fuerte y desagradable. El dióxido de nitrógeno puede ser líquido a temperatura ambiente, pero se transforma en un gas pardo-rojizo a temperaturas sobre los 21 °C.

Se tienen límites de concentraciones permitidas de NO_2 en la atmósfera, por ser el más prevalente generado por las actividades humanas, y se evalúa en conjunto con el Ozono troposférico, dado que éste tiene una estrecha vinculación debido a su generación y consumo, en reacciones dinámicas en la atmósfera con los óxidos de nitrógeno, y compuestos orgánicos volátiles.

El nitrógeno diatómico gaseoso, al estar formado por un enlace triple, es muy poco reactivo, pero en las combustiones llevadas a cabo a altas temperaturas, el nitrógeno logra reaccionar con el oxígeno (que es muy reactivo) formando los diversos tipos de óxidos de nitrógeno.

Los óxidos de nitrógeno son liberados al aire desde los tubos de escape de vehículos motorizados (sobre todo diésel y de mezcla pobre), de la combustión de leña, petróleo, carbón y gas natural, y durante procesos a altas temperaturas tales como la soldadura por arco eléctrico, galvanoplastia, grabado de metales y detonación de dinamita. También son producidos comercialmente al hacer reaccionar el ácido nítrico con metales o con celulosa.

Los NO_x se generan en la naturaleza, siendo las causas más frecuentes los incendios forestales, la actividad volcánica y la descomposición bacteriana de determinados nitratos.

El principal efecto nocivo de los Óxidos de Nitrógeno sobre la calidad del aire, lo dan las nieblas tipo smog, las que son particularmente conocidas en algunas partes del mundo, dado la facilidad para percibirla visualmente frente a ciertas condiciones. Estas nieblas pueden ser de tipo industrial o fotoquímicas, y se componen fundamentalmente de partículas, óxidos de nitrógeno, ozono y compuestos orgánicos volátiles.

La niebla de color pardo que puede formarse, tiene efectos claros para la ciudadanía como la reducción de visibilidad, y puede generar efectos generalizados sobre la salud pública, que van desde reacciones alérgicas, hasta la muerte, dependiendo de la sensibilidad de la población afectada.

Este impacto sobre la calidad del aire (formación de smog), es notorio sobre las principales ciudades del mundo por la concentración de población, dado que el emisor principal de óxidos de nitrógeno suele ser la flota vehicular.

Una vez liberados al aire, los óxidos de Nitrógeno forman contaminantes secundarios a través de reacciones fotoquímicas, como por ejemplo el PAN (nitrato de peroxiacetilo) producido en el equilibrio térmico con radicales peroxi- orgánicos por la oxidación en fase gaseosa de una variedad de compuestos orgánicos volátiles, o aldehídos y otros compuestos orgánicos volátiles oxigenados, oxidantes en presencia de NO₂.

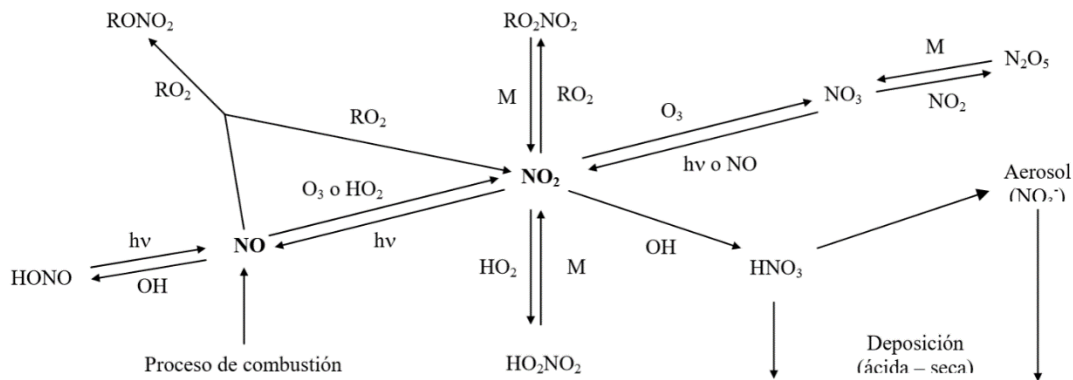
Estos compuestos (PAN) son buenos marcadores de la fuente de compuestos orgánicos volátiles, ya sea biogénica o antropogénica, y es útil en el estudio de los efectos globales y locales de los COV.

Los PAN son tóxicos para las plantas e irritantes, y se disuelven más fácilmente en agua que el ozono. Son lacrimógenos, causando irritación en los ojos en concentraciones de sólo unas pocas partes por mil millones. En concentraciones más altas causan grandes daños a la vegetación.

En Uruguay, los límites de exposición para calidad de aire, se presentan en el Decreto 135/021, y regulan la concentración de NO₂ y Ozono. Los valores son máximos horarios, de promedios de 8 horas, y anuales, especificándose valores de tolerancia y excedencias permitidas.

4.2. Dinámica de los compuestos de nitrógeno en aire

La química de los compuestos de Nitrógeno en la tropósfera es dinámica, principalmente por la capacidad de algunas especies para reaccionar en presencia de luz solar entre sí y con otros compuestos y contaminantes presentes en la atmósfera, lo cual se ejemplifica en la Ilustración 4.1 a continuación.

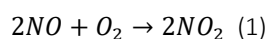


M molécula; R compuesto orgánico volátil

Ilustración 4- 1 Química de los óxidos de nitrógeno durante el día. Extraído de (Madruga, 2006)

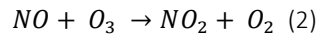
Química Diurna

La fuente dominante de los óxidos de nitrógeno en el aire son los procesos de combustión, generándose como monóxido de nitrógeno (NO) mayoritariamente. Este compuesto, cuando se encuentra en altas concentraciones y se encuentra en presencia de oxígeno, es oxidado a dióxido de nitrógeno, según la siguiente reacción:

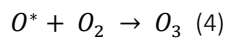
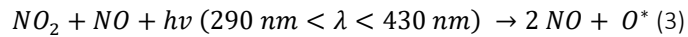


La velocidad de reacción de formación de NO₂ a partir de NO se da con mucho mayor intensidad cerca de los focos de emisión, donde la concentración de NO es alta, pero para valores de concentración más bajos, como los observables a nivel de calidad de aire, la conversión a NO₂ disminuye rápidamente.

En condiciones troposféricas, la reacción entre NO y ozono (O₃) es la vía principal de producción de NO₂, siendo poco significativa la reacción de NO con Oxígeno.

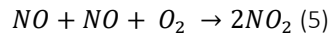


Durante las horas de luz diurnas, el NO₂ sufre un proceso de reconversión a NO, como resultado de la fotólisis, permitiéndose en igual manera la generación de O₃.



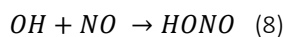
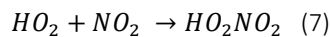
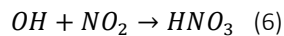
donde: O* es un radical oxígeno, y hv corresponde a luz de longitud de onda en el rango ultravioleta indicado.

Las concentraciones necesarias de dióxido de nitrógeno para la producción de ozono, son de 0,02 ppb a 0,03 ppb de NO₂. Una pequeña fracción del NO generado según la reacción (3), puede reaccionar con el radical hidroperoxilo (HO₂) u otro radical peróxido regenerando NO₂. En episodios de smog en Inglaterra, se observó que con bajos niveles de ozono (< 30 ppb), el NO₂ es generado de la siguiente manera:

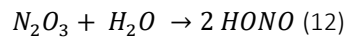
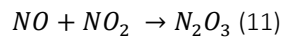
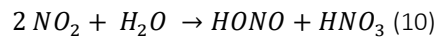
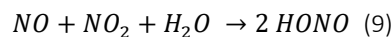


El compendio de reacciones, anteriormente descrito, constituye el llamado "ciclo de los óxidos de nitrógeno", dando lugar a un incremento en la concentración ambiental de ozono.

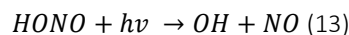
La reacción de los óxidos de nitrógeno con radicales HO (OH y HO₂) permite la generación de ácido nítrico (HNO₃), ácido peroxinitrico (HO₂NO₂) y ácido nitroso (HONO). La reacción de OH con NO₂ para formar HNO₃ es particularmente importante durante el día, porque desempeña un papel importante en el control de los niveles de óxidos de nitrógeno.



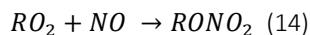
El ácido nitroso puede ser generado también según las siguientes reacciones:



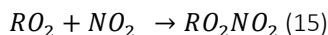
A su vez, el ácido nitroso (HONO) actúa como reservorio temporal para NO_x, puesto que es rápidamente fotolizado, por radiación próxima al ultravioleta.



La reacción entre el NO y el radical orgánico peroxilo (RO₂) permite la formación de nitratos orgánicos.



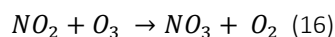
De igual manera, la formación de nitratos orgánicos puede llevarse a cabo mediante la reacción de NO_2 con el radical orgánico peroxilo.



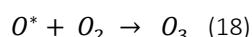
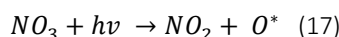
Química Nocturna

Aunque la mayoría de los procesos oxidativos son iniciados por la presencia de la luz solar, existen procesos oxidativos que pueden ocurrir durante la noche. Estos procesos no pueden generar O_3 , pero generan otra serie de contaminantes secundarios, incluido H_2O_2 .

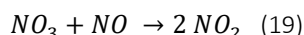
A través del ciclo diurno, el NO_2 es lentamente convertido a NO_3 , por reacción con el O_3 :



Sin embargo, durante el ciclo diurno, el NO_3 es fotolizado rápidamente, en pocos segundos, permitiendo la regeneración de O_2 y O_3 .

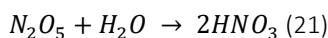
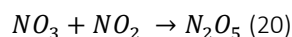


De igual manera, el NO_3 reacciona rápidamente con NO , permitiendo la regeneración de NO_2 .

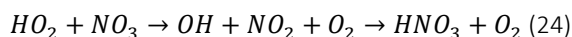
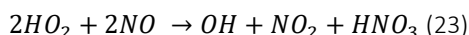
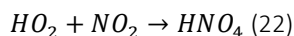


Por tanto, la importancia del NO_3 , en el ciclo diurno, se encuentra severamente limitada puesto que, a longitudes de onda inferiores a 640 nm, se fotodisocia; de ahí que su concentración durante el día no sea significativa. Sin embargo, la química nocturna de NO_3 y NO_x difieren de la química diurna. Una vez generado NO_2 según la reacción (2), en el ciclo nocturno, éste no es capaz de fotodisociarse por ausencia de luz solar, según la reacción (3) y ni de reaccionar con ozono, debido a sus bajos niveles, según la reacción (16).

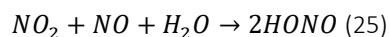
Por tanto, el NO_2 en el ciclo nocturno, reacciona con el NO_3 para generar pentóxido de dinitrógeno (N_2O_5), el cual reacciona con agua para generar ácido nítrico (HNO_3)



La hidrólisis heterogénea de N_2O_5 es un proceso importante para la química troposférica de los óxidos de nitrógeno. También se puede generar ácido pernitrírico y nítrico, respectivamente, es a partir de la reacción del vapor de agua con NO_2 , con NO o NO_3 .



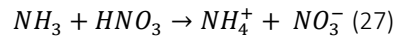
De igual manera, mediante la reacción de agua con dióxido de nitrógeno, se forma ácido nítrico y ácido nitroso.



Los nitratos, en forma de aerosoles, existen primariamente como sales de nitrato, principalmente como nitrato amónico (NH_4NO_3), y otros, como nitrato sódico (NaNO_3).

La oxidación de los óxidos de nitrógeno ocurre según la reacción (6), durante el ciclo diurno, y mediante la hidrólisis de N_2O_5 durante el ciclo nocturno, según la reacción (21).

La formación de los aerosoles de nitrato, requieren la presencia de NH_3 , u otras especies alcalinas, para formar sales tales como nitrato amónico, según la reacción:



El equilibrio de esta reacción se encuentra influenciado por la temperatura, humedad relativa y pH, favoreciéndose la reacción a baja temperatura, alta humedad relativa y bajo pH.

Los óxidos de nitrógeno desempeñan un importante papel en la formación de los radicales libres. Un número de reacciones importantes son las que tienen lugar entre el NO_2 y las partículas de naturaleza carbonosa.

El NO_2 puede reaccionar no solo con diferentes gases emitidos por fuentes vehiculares, sino también con las partículas emitidas por éstos. Así el NO_2 , puede ser reducido a NO sobre las superficies de las partículas carbonosas, en tanto a altas humedades relativas es convertido en ácido nitroso (HONO).

Mediante el proceso de deposición, los contaminantes atmosféricos se depositan sobre la superficie de la tierra, y esto se analiza en dos procesos: deposición húmeda y deposición seca.

Deposición húmeda

El proceso de deposición húmeda incluye dos procesos: la eliminación del contaminante por la precipitación (washout) o la incorporación del contaminante a la nube (rainout), para posteriormente pasar a la superficie de la tierra con la lluvia.

Deposición seca

Ocurre en ausencia de precipitación. Los procesos comunes de deposición para gases son: absorción (por ej. el ingreso de gases a través de los estomas de una planta), adsorción y adhesión (por acumulación por efecto de fuerzas físicas sobre las superficies). La deposición seca es un proceso de eliminación importante para compuestos en fase vapor y particulado, tales como ozono (O_3), óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2), ácido nítrico (HNO_3) y nitrato amónico (NH_4NO_3).

La deposición seca generalmente depende, además de la naturaleza del contaminante, de factores meteorológicos y de la capacidad de la vegetación, suelo y agua para captar sustancias. Para la deposición seca de NO_2 , también intervienen diversas reacciones químicas.

Por todo lo anteriormente mencionado, puede concluirse que la química atmosférica de los compuestos de nitrógeno es compleja, y dependiente de la presencia de otros contaminantes y de los parámetros meteorológicos, razón por la cual no es fácil la simulación de situaciones de dispersión; los métodos conservativos como el Gaussiano no resultan adecuados, debiéndose incluir la dinámica propia, al menos de la cinética química de las reacciones principales y de la meteorología en la región de estudio. En bibliografía se recomienda el uso de modelos Lagrangianos o Eulerianos, de escala regional para la simulación de la formación de smog fotoquímico, como el AERE del Reino Unido, Stern de Alemania u otros (Seoánez, 2002).

En la Ilustración 4-2, se presenta un gráfico de concentraciones típicamente observadas de Óxidos de Nitrógeno y Ozono durante el día en la ciudad de Madrid, que coincide cualitativamente con el comportamiento de las ciudades densamente pobladas, con predominancia de fuentes vehiculares.

Para el análisis del comportamiento de estos gases, los estudios actuales de modelización¹⁰ resumen las interacciones químicas existentes, considerando como mínimo el seguimiento de los tres óxidos más estables y la concentración de Ozono, usando un modelo de transporte químico no Gaussiano como el “Chimere”¹¹, acoplado con modelos meteorológicos e inventarios de emisiones, a diferentes escalas espaciales y temporales.

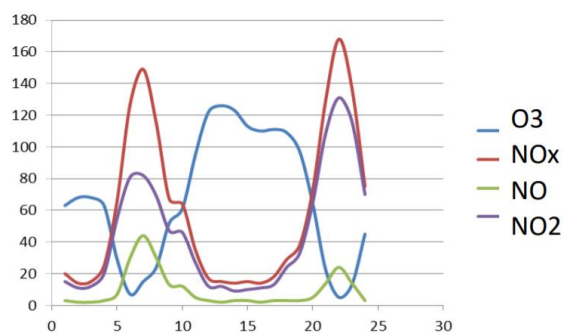


Ilustración 4- 2 Comportamiento típico diario de las concentraciones horarias de NO_x y O₃ en Madrid.

Estos procesos propios de la química de los compuestos de nitrógeno en la atmósfera, traen aparejado que los efectos de las emisiones de NO_x puedan apreciarse a largas distancias, siendo la deposición de compuestos nitrogenados presentes en la atmósfera, objeto de tratados y protocolos internacionales para evitar la contaminación transfronteriza a gran distancia. La deposición de compuestos nitrogenados, contribuye a una degradación del medio ambiente, que va más allá de los efectos sobre la salud de la población que pueda generar localmente un posible exceso de NO₂ y/u Ozono en inmisión. Los aportes atmosféricos por deposición de compuestos nitrogenados, están considerados como el tercer factor de pérdida de diversidad biológica a escala global, después de los cambios de uso del suelo y del cambio climático (García-Gómez et al., 2017). El Protocolo internacional de Gotemburgo relativo a la reducción de la acidificación, la eutrofización y el ozono troposférico, establece “techos nacionales” para la emisión de los cuatro contaminantes precursores causantes de la acidificación, la eutrofización o el ozono troposférico: dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV) y amoníaco (NH₃). Los países miembros que actualmente forman parte de este convenio, son en su mayoría países europeos, Canadá y Estados Unidos.¹²

4.3. Aspectos de calidad de aire y salud

El valor de 40 µg/m³ (de media anual) fijado en las Directrices de la OMS 2005 y el Decreto 135/021, ha bajado en las Directrices OMS 2021 a 10 µg/m³ (de media anual) y 25 µg/m³ para un período de 24h, con el objetivo de proteger a la población de los efectos nocivos para la salud del NO₂ gaseoso. En concentraciones de corta duración superiores a 200 µg/m³, es un gas tóxico que causa una importante inflamación de las vías respiratorias

Es la fuente principal de los aerosoles de nitrato, que constituyen una parte importante del PM 2,5 y, en presencia de luz ultravioleta, del ozono.

Estudios epidemiológicos han revelado que los síntomas de bronquitis en niños asmáticos aumentan en relación con la exposición prolongada al NO₂. La disminución del desarrollo de la función

¹⁰ <http://www.fundacionnaturgy.org/wp-content/uploads/2019/05/5.-marta-garcia.pdf> - consulta mayo 2021

¹¹ <https://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/> - consulta mayo 2021.

¹² https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2019-11459 – consulta junio 2021,

pulmonar también se asocia con las concentraciones de NO₂ registradas (u observadas) actualmente en ciudades europeas y norteamericanas.

El óxido nítrico y el dióxido de nitrógeno son líquidos o gases no inflamables; sin embargo, acelerarán la quema de materiales combustibles. El olor generalmente proporciona una advertencia adecuada de exposición aguda siempre que haya óxidos superiores (NO₂, N₂O₄ y N₂O₅). El óxido nítrico (NO) es inodoro y el óxido nitroso tiene un olor muy tenue. En contacto con la humedad, el dióxido de nitrógeno forma una mezcla de ácidos nítricos y nitrosos.

A continuación en la Ilustración 4.3, se compiló posibles respuestas observadas en humanos a distintas concentraciones y tiempos de exposición al Dióxido de Nitrógeno:

Concentración NO ₂ µg/m ³	Respuestas registradas en humanos
3,76 x 10 ⁵	LC _{Lo} Inhalación humanos
3,27 x 10 ⁵	LC ₅₀ en humanos
2,82 x 10 ⁵	Muerte por edema pulmonar en humano
1,69 x 10 ⁵	Tos, disnea y otros cambios en humanos
5,63 x 10 ⁴	LOAEL irritación respiratoria y tos severa
3,76 x 10 ⁴	Peligro inmediato para la vida o la salud (IDLH)
1,88 x 10 ⁴	Levemente irritante para humanos
3,76 x 10 ³	Inflamación bronquial
1,13 x 10 ³	resistencia viral reducida
560	Efecto directo en función pulmonar de asmáticos
500	Efectos agudos en la salud humana
376	Se observó reacción en asmáticos
207	LOAEL humanos Pequeñas reducciones en la función pulmonar y cambios en capacidad de respuesta de la vía aérea.
200	aumento en la respuesta bronquial de asmáticos - Estándar OMS
188	motilidad suprimida de macrófagos en humanos
40	Efectos en sistemas respiratorios en lactantes (en conjunto con MP)

LCLO: Concentración Letal más baja en aire que ha causado la muerte. CL50: Concentración Letal 50, la que la mitad de la muestra de población muere a causa de la exposición a través de la inhalación o la respiración. LOAEL: menor concentración o cantidad de una sustancia, hallada experimentalmente o por observación, que provoca una alteración adversa distinguible de los observados en organismos normales (control), de la misma especie bajo condiciones definidas e idénticas a las de exposición. IDLH: concentración que representa un peligro inmediato para la vida o la salud.

Ilustración 4- 3 NO₂ y efectos registrados. Elaboración propia a partir de trabajo de posgrado (L. Marisquirena, 2019)

4.4. Fuentes de emisión de Óxidos de Nitrógeno

De forma natural los Óxidos de Nitrógeno se producen en las tormentas (rayos), incendios, erupciones volcánicas y procesos de nitrificación/desnitrificación. El origen antropogénico más habitual es la oxidación del nitrógeno del aire en los procesos de combustión a temperaturas elevadas. Los motores de combustión interna son la fuente de estos compuestos más importante en las ciudades. Los motores Diésel, en términos generales, emiten mayores cantidades de NO_x con relación a un motor de gasolina para el mismo recorrido, debido a que, para su funcionamiento, utilizan mezclas ricas en aire, que explotan a mayor presión y temperatura. Sin embargo, las emisiones asociadas al sector vehicular de cada país dependen fuertemente de las características de la distribución de su parque vehicular.

También los procesos industriales en hornos o cámaras de combustión a altas temperaturas, generan emisiones importantes de NO_x.

En la formación de estos compuestos en procesos de combustión, tienen importancia los siguientes parámetros:

- Temperatura: Por encima de 1.500 °C se dispara drásticamente su formación.

- Oxígeno/combustible: El combustible es más ávido por el oxígeno que el nitrógeno; por ello, si la combustión se produce con una relación adecuada oxígeno/combustible, la producción de NO_x será menor.
- Tiempo: La formación de NO_x es más lenta que el proceso de combustión; si el enfriamiento de los gases de combustión es rápido, la producción de estos compuestos será menor.

4.5. Métodos de medición de NO_x

Emisiones al aire

El método para determinación de Óxidos de Nitrógeno en emisión, que es internacionalmente utilizado como referencia, es el establecido por EPA, en su Método 7. Consiste en realizar un muestreo relativamente sencillo, pero siempre que se cuente con el equipamiento adecuado. Se retira una muestra tomada al azar en el puerto de medición con que cuenta la chimenea, con un matraz al vacío. El matraz contiene una solución de ácido sulfúrico y agua oxigenada, que reacciona con los óxidos de nitrógeno. Para el cálculo de la velocidad total de la emisión en masa, es necesario determinar el volumen o contenido de humedad de la corriente del gas de salida y la muestra se envía al laboratorio. Las determinaciones posteriores son realizadas por diferentes métodos en el laboratorio. Cada muestra tomada al azar se obtiene con bastante rapidez pero ha de tomarse una serie de éstas, para contar al menos tres corridas, las cuales a su vez suelen componerse de cuatro tomas cada una.

Se presenta en la Ilustración 4.4, un dibujo del tren de muestreo utilizado para la obtención de las muestras:

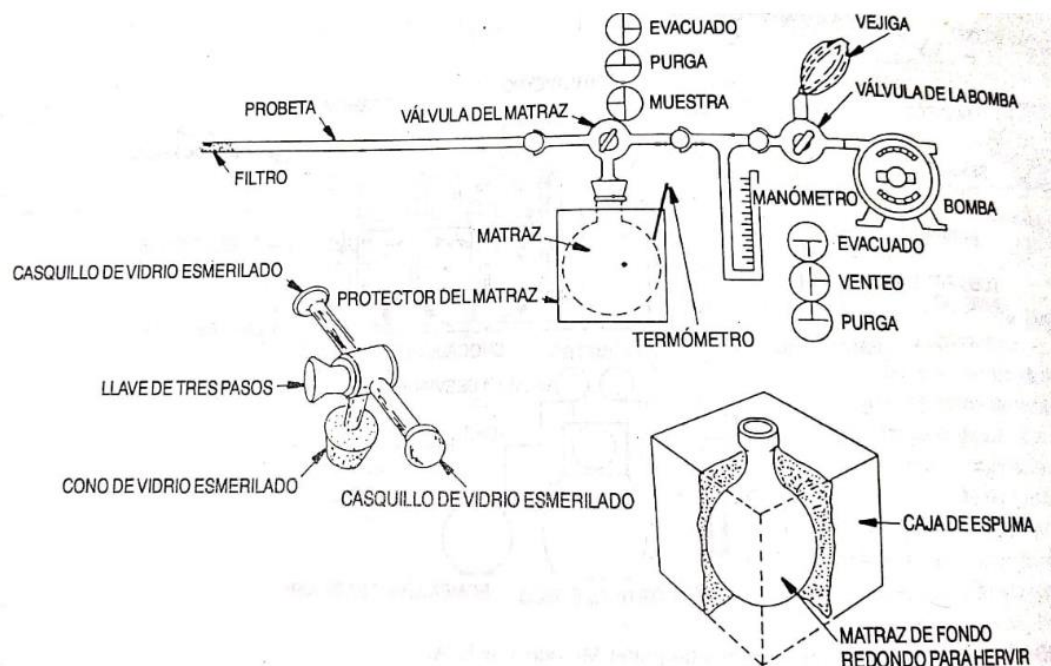


Ilustración 4-4 Tren de muestreo para medición de NO_x, metodología EPA 7.

- Method 7 "Determination of Nitrogen Oxide Emissions from Stationary Sources". USEPA Code of Federal Regulations 40, pt. 60 app. A.

- Method 7A "Determination of Nitrogen Oxide Emissions from Stationary Sources-Ion Chromatographic Method". USEPA Code of Federal Regulations 40, pt. 60, app. A.
- Method 7B "Determination of Nitrogen Oxide Emissions from Stationary Sources" (Ultraviolet Spectrophotometry). USEPA. Code of Federal Regulations 40, pt. 60, app. A.
- Method 7C. "Determination of Nitrogen Oxide Emissions from Stationary Sources - Alkaline Permanganate / Colorimetric Method". USEPA Code of Federal Regulations 40, pt. 60, app. A.

En nuestro país y en la región, también suelen usarse analizadores portables, para la medición de gases de combustión in situ en las condiciones de emisión de chimenea (Para O₂, SO₂, NO_x y CO); la norma de referencia para estas mediciones, es la EPA-ICAC CTM 034-2009 Determination of Oxygen, Carbon Monoxide and oxides of Nitrogen.

Mediciones de calidad de aire:

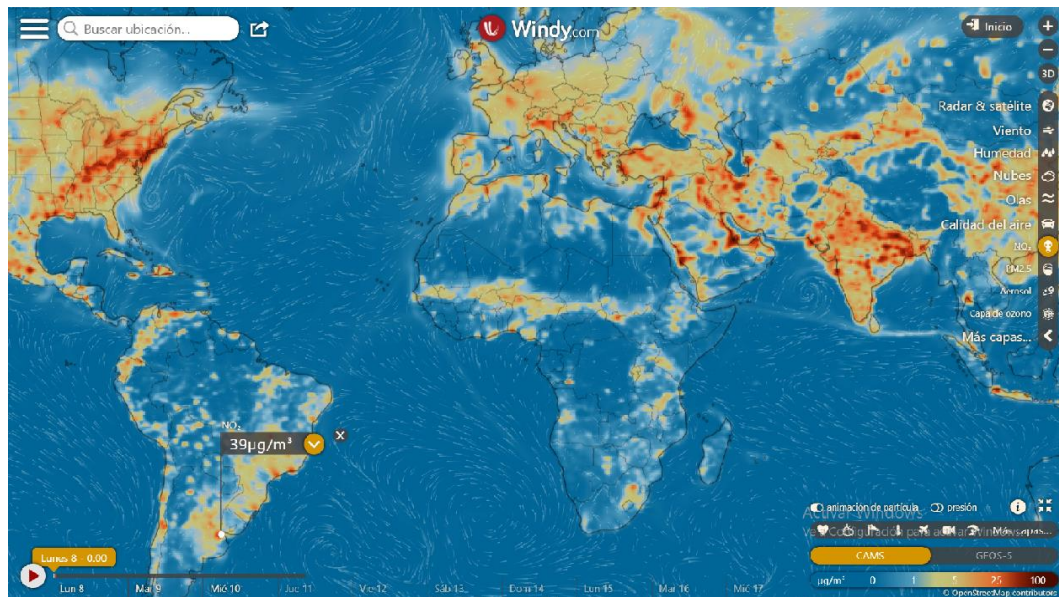
- CFR 40 - Appendix F to Part 50 - Measurement Principle and Calibration Procedure for the Measurement of Nitrogen Dioxide in the Atmosphere (Gas Phase Chemiluminescence).

En la normativa promulgada en mayo de 2021, Decreto 135/021, se indica que el Ministerio de Ambiente establecerá guías, protocolos e instructivos, incluyendo las metodologías de monitoreo de referencia, para la medición de las emisiones y calidad de aire en Uruguay.

4.6. Gestión de los Óxidos de Nitrógeno a nivel internacional

Las concentraciones de óxidos de nitrógeno y ozono troposférico, no se han logrado disminuir en forma eficaz en los centros urbanos de los países desarrollados, debido principalmente al crecimiento sostenido del parque vehicular.

Se puede ejemplificar lo anterior, al visualizar las concentraciones de NO_x interpretadas a partir de imágenes satelitales y estaciones de calidad de aire, provistas por el Servicio de Monitoreo Atmosférico Copernicus (CAMS por sus siglas en inglés), en la Ilustración 4-5. Se puede apreciar que los máximos de concentración se distribuyen siguiendo la ubicación de los principales centros urbanos, y las corrientes de viento establecidas según el momento de su consulta.



Fuente: windy.com, consultado el 08/11/2021.

Ilustración 4- 5 Distribución mundial de NO_x, según programa satelital “Copernicus”.

Copernicus es el programa de Observación y monitoreo de la Tierra, coordinado y gestionado por la Comisión Europea. Los datos que se presentan en la imagen, consideran tanto los reportes recibidos por CAMS, como los simulados partir del modelo meteorológico ECMWF IFC, el cual tiene una resolución horizontal de 40 km.

A nivel internacional, las medidas de gestión adoptadas para el parámetro NO_x y Ozono son contempladas conjuntamente, y vienen asociadas al objetivo de disminución de las emisiones aportadas por el rubro vehicular principalmente, y luego en menor medida según el caso, por el control sobre las emisiones industriales.

A continuación se transcribe un extracto del documento final establecido a partir de una Convención de Medio Ambiente en España, en el año 2012, con relación a la gestión de la calidad del aire y el NO_x:

“Todos los resultados expuestos muestran que es necesario disminuir las emisiones del tráfico rodado para cumplir los objetivos de aire ambiente de NO₂ en la mayoría de las ciudades españolas y que el esfuerzo ha de ser muy grande debido a las altas emisiones de los vehículos diésel de pasajeros modernos, y a la gran dieselización de nuestro parque de vehículos. También, que la disminución no ha de seguir criterios puramente cuantitativos de reducción de emisiones del inventario de emisión. Por el contrario, debería priorizarse seguir criterios cualitativos, tales como la disminución de emisiones en zonas céntricas, vías próximas a centros escolares, edificios públicos, centros de trabajo,...; así como la planificación de la distribución de la red de transporte público para minimizar la posibilidad de crear puntos negros de exposición de NO₂ por concentración de emisiones de motores. A pesar de que en la mayoría de los casos las superaciones de los valores límite de NO₂ se deben a las emisiones del tráfico, no se puede descartar que existan superaciones específicas en algunos puntos negros de tipo industrial. En estos casos la variación horaria de los niveles de NO₂ no sigue el patrón del tráfico y puede así ser identificada la influencia industrial. Una vez demostrado el origen industrial, se ha de actuar sobre emisiones canalizadas mediante la aplicación de tecnologías ambientales basadas tanto en medidas primarias (sustitución de materias primas y/o combustibles, modificación de las condiciones de operación, uso de quemadores de bajo nivel de NO_x), como en medidas secundarias con

plantas De-NO_x, que reducen el NO_x a N₂ (los sistemas más habituales se basan en la inyección de amoníaco o urea en sistemas catalíticos o no catalíticos, dependiendo de la temperatura)."

4.7. Instrumentos para la gestión de la calidad de aire en Uruguay

En nuestro país, la calidad de aire se encuentra comprendida en el marco de la Ley General de Protección al Ambiente (L17283, del 28/11/2000).

En su artículo 17, se establece que:

"Queda prohibido liberar o emitir a la atmósfera, directa o indirectamente, sustancias, materiales o energía, por encima de los límites máximos o en contravención de las condiciones que establezca el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. A tales efectos, dicho Ministerio tendrá en cuenta los niveles o situaciones que puedan poner en peligro la salud humana, animal o vegetal, deteriorar el ambiente o provocar riesgos, daños o molestias graves a seres vivos o bienes."

En este marco y luego de la promulgación de la ley 16466 de Autorizaciones Ambientales, se ha venido implementando las exigencias de prevención y control de las emisiones al aire, junto a las Autorizaciones Ambientales de los establecimientos que requirieron de autorización ambiental y sus requisitos operativos específicos. (37 ámbitos de aplicación).

La reglamentación específica del artículo 17 de la Ley 17283, se realizó recién en el año 2021 con el Decreto 135/021, y en ella se menciona explícitamente la protección del ambiente y prevención de la contaminación del aire mediante el establecimiento de objetivos de calidad de aire. Además, se establece que cuando de las evaluaciones ambientales resulte que en determinado sitio o zona no se alcanzan los objetivos de calidad de aire, el Ministerio de Ambiente elaborará y ejecutará planes de acción para mejorar la calidad del aire.

Adicionalmente en el PNADS, se mencionan tres grandes objetivos de mejora relacionados con la calidad del aire, vinculados fundamentalmente con la emisión de partículas. No obstante, no se propuso planes de acción, vinculados específicamente con los óxidos de nitrógeno. Como se presentó anteriormente, este gas es precursor de PM_{2,5}, ya que promueve la formación de micropartículas, las que además de contaminar el aire, contribuyen a la acidificación del suelo y afectan potencialmente a la vegetación. Un plan de gestión para el control de estas partículas PM_{2,5} en calidad del aire, tendría también que contemplar las emisiones de gases como el NO_x y SO₂.

Considerando el crecimiento sostenido y previsible para el parque vehicular en términos generales para nuestro país, así como la situación en la que se encuentran muchos países desarrollados con relación a este contaminante, es oportuno el encare de trabajos nacionales con investigaciones geo-específicas, que analicen posibles situaciones, con relación a localidades con presencia de grandes emisores de NO_x.

La mitigación de emisiones de NO_x procedentes del parque vehicular, es uno de los puntos clave para la gestión de la calidad del aire urbano. En nuestro país, las medidas de gestión relacionadas con el ordenamiento de la movilidad urbana, es materia de las Intendencias Departamentales, pero también son impulsadas por proyectos y políticas nacionales, como las impulsadas a raíz de los aportes al Cambio Climático.

Emisiones de NO_x por sector

Según el inventario nacional de emisiones realizado para el año 2015, a cuyos datos se tuvo pleno acceso, el sector vehicular emite más del 60 % del NO_x estimado a nivel país, el 25 % del mismo lo emite el sector industrial y el 9 % el sector agropecuario, como lo muestran las Ilustraciones 4-6 y 4-7 que se presentan a continuación.

Sector	NO _x (ton/año)
Agropecuario	4369
Industrial	12827
Residencial	1691
Servicios y Comercios	265
Vehicular	28441
TOTAL	47593

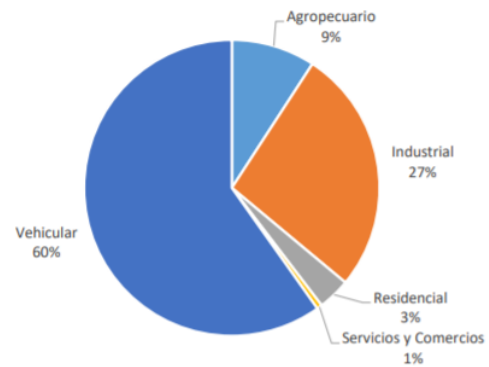


Ilustración 4- 6 Ton/año de emisión NO_x por sector.
Fuente: Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015

Ilustración 4- 7 Emisión de NO_x por sector en % del total, fuente: (Cataldo et al., 2019)

Emisión de NO_x por rubro industrial

Con relación al total de Óxidos de Nitrógeno emitidos por el sector industrial, el rubro Minerales no Metálicos es el mayor emisor (57 %), seguido las centrales térmicas y las industrias lácteas en igual proporción (8 % cada uno), y los rubros Petróleo y Carbón y Celulosa y Papel también en igual proporción (7 % cada uno).

Las emisiones del rubro “Minerales no metálicos”, son generadas fundamentalmente por la producción de clinker y cal, las que corresponden al 15 % del total de Óxidos de Nitrógeno emitidos al ambiente. Esto se presenta en la Ilustración 4.8, y en la Ilustración 4.9 se indican las emisiones estimadas, en términos de Toneladas anuales.

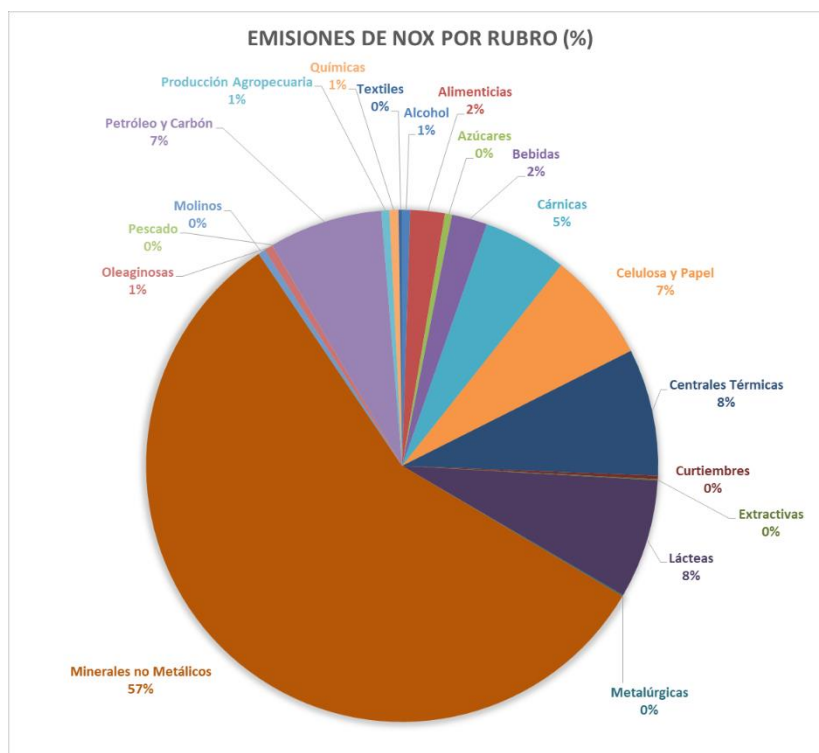


Ilustración 4- 8 Emisiones de NO_x del sector industrial por rubros en %

Rubro	
Minerales no Metálicos	6220
Celulosa y Papel	3487
Centrales Térmicas	955
Petróleo y Carbón	852
Lácteos	344
Cárnicas	237
Alimenticias	176
Azúcares	92
Bebidas	89
Químicas	78
Oleaginosas	63
Producción Agropecuaria	61
Alcohol	60
Molinos	54
Curtiembres	26
Textiles	16
Metalúrgicas	9
Extractivas	8
Pescado	1

Ilustración 4- 9 Emisiones de NO_x del sector industrial por rubros en Ton/año

Emisión de NO_x por departamento, proveniente de fuentes vehiculares e industriales

Considerando los aportes inventariados, se tiene que para los departamentos de Lavalleja y Paysandú, las emisiones de NO_x del rubro industrial, son superiores a las generadas por la flota vehicular. En las Ilustraciones 4.10 y 4.11, se presenta lo anterior en términos de carga anual y gráficamente, por departamento.

Departamento	NOx Vehicular (ton/año)	NOx Industrial (ton/año)
Treinta y Tres	460	126
Tacuarembó	972	104
Soriano	852	56
San José	1403	636
Salto	1118	94
Rocha	665	6
Rivera	467	175
Río Negro	917	1721
Paysandú	936	3469
Montevideo	6614	1287
Maldonado	2181	102,8
Lavalleja	938	2871
Florida	679	27
Flores	617	6
Durazno	505	18
Colonia	2232	1941
Cerro Largo	838	15
Canelones	5568	165
Artigas	477	107

Ilustración 4- 10 Aporte vehicular e industrial

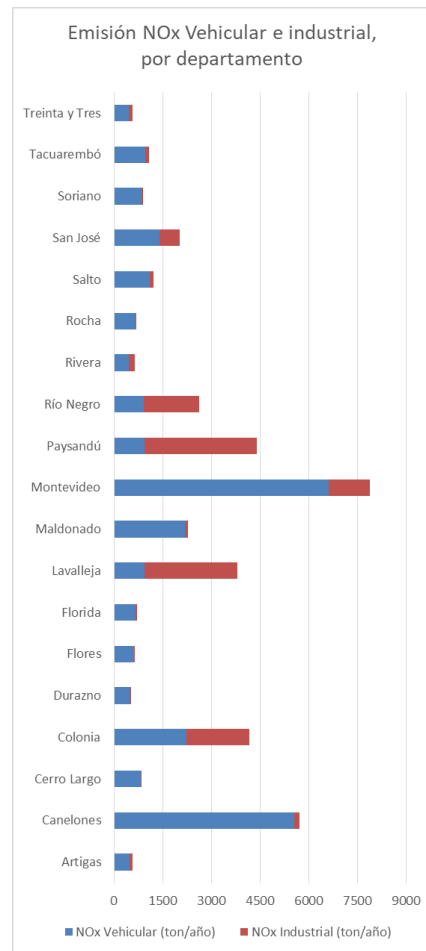


Ilustración 4- 11 Gráfico de aporte vehicular e industrial por departamento, en Ton/año

En los capítulos siguientes, se analizan las emisiones de NO_x generadas por las empresas productoras de clínker, las cuales corresponden al segundo grupo de emisores más grandes de óxidos de nitrógeno en el país, luego de las emisiones vehiculares. Localmente para los departamentos de Paysandú y Lavalleja, los emisores industriales de estas plantas, son los que contribuyen con la mayor proporción de emisión de NO_x.

5. Producción de clinker y cemento

5.1. Clinker y cemento

Los componentes físicos de sostén de muchas de las ciudades del mundo, son el hormigón o concreto; éste compone las calles, edificios, construcciones y demás infraestructuras que los sostienen y comunican. Este material, es uno de los que tienen mayor producción y consumo a nivel mundial, y se compone tradicionalmente de arena, grava, agua y **cemento**.

El **cemento** está compuesto por conglomerantes hidráulicos, materiales artificiales de naturaleza inorgánica y mineral, que finamente molidos y convenientemente amasados con agua, forman pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados, mecánicamente resistentes y estables, tanto al aire libre como debajo del agua, por lo que es utilizado internacionalmente y desde hace centenares de años, como base para la construcción.

Los tipos de cemento varían según sus aditivos y constituyentes, pero el **clinker** es el principal componente del cemento.

El **clinker portland**, se obtiene al calcinar hasta fusión parcial, mezclas íntimas de calizas y arcillas preparadas artificialmente, hasta conseguir la combinación prácticamente total de sus componentes. Este producto, se obtiene a partir de la calcinación y sinterización de la mezcla cruda, a altas temperaturas, durante tiempos controlados en instalaciones especializadas (Hornos de Clinker).

Los cementos se producen al mezclar íntimamente el clinker con los diferentes constituyentes, existiendo normas técnicas y reglamentaciones específicas que establecen sus propiedades y permiten su comercialización en los diferentes países.

Los constituyentes de los cementos son en general los siguientes: clinker Portland, clinker aluminoso, escorias siderúrgicas, puzolanas naturales, cenizas volantes, humos de sílice, fillers calizos, reguladores de fraguado, y otros aditivos. La proporción puede ser variable, pero la producción para la venta es regulada por normas según los diferentes países.

A modo de ejemplo, los materiales que pueden ser empleados como adición al clinker en la molienda de cemento están especificados en normas, como la europea EN 197-1/2011, en la que se describen los componentes del cemento portland común y sus especificaciones, así como clasificaciones para los cementos en “tipos”, según sus componentes, y en “clases” según su resistencia; y en esta se describen composiciones y especificaciones para diferentes cementos (Sanjuán & Argiz, 2012).

5.2. Estadísticas de producción de cemento

En el mundo

Según lo presentado por la Federación Interamericana del Cemento en su revista publicada en julio de 2020, el consumo mundial de cemento de los últimos años se encuentra en torno a las 4000 millones de toneladas anuales lo cual se puede ver en la Ilustración 5.1., siendo las principales regiones productoras el Norte de Asia (aproximadamente 60 %), el Subcontinente Indio (11 %) y Europa (9 %); Latinoamérica y el Caribe tienen una aportación de aproximadamente 4 % a la producción mundial, lo cual se muestra en las Ilustraciones 5.2 y 5.3. Es interesante ver en la ilustración 5.4., que mientras la mayoría de las subregiones presentadas tienen más importaciones

que exportaciones, Europa, Medio Oriente y el sur de Asia, durante los últimos años han exportado mucho más de lo que importaron, siendo éstos proveedores netos del material.

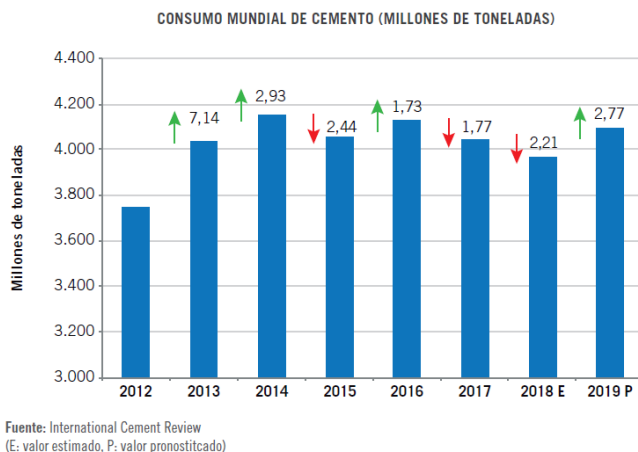


Ilustración 5- 1 Consumo mundial de cemento (Millones de Toneladas). Fuente: (FICEM, 2020)

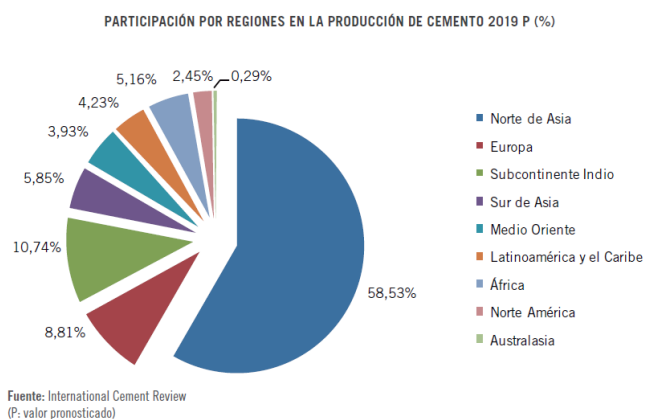


Ilustración 5- 2 Participación por regiones en la producción de cemento de 2019. Fuente:(FICEM, 2020)

Main World Producers - The G20 Group											
Cement production (Million tonnes)											
Country	2001	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
China	661.0	1 644.0	1 881.9	2 063.2	2 137.0	2 420.0	2 480.0	2 350.0	2 403.0	2 316.3	2 176.7
India	102.9	205.0	220.0	240.0	270.0	280.0	260.0	270.0	289.3	285.0	327.7
EU28 *	225.6	209.0	192.1	191.6	172.6	166.6	166.8	167.2	169.1	175.1	179.8
USA	88.9	63.9	65.2	68.6	74.9	77.4	83.2	83.4	84.7	86.1	87.8
Brazil	39.4	51.7	59.1	63.0	68.8	70.0	72.0	72.0	57.6	54.0	53.5
Turkey	30.0	54.0	62.7	63.4	63.9	72.7	71.2	71.4	75.4	80.6	72.5
Russian Federation	28.7	44.3	50.4	56.1	53.0	72.0	68.4	69.0	55.0	54.7	53.7
Indonesia	31.1	36.9	39.5	45.2	32.0	56.0	65.0	65.0	61.3	68.0	70.8
South Korea	52.0	50.1	47.4	48.2	48.0	47.3	63.2	63.0	56.7	57.9	55.0
Japan	79.5	59.6	56.6	56.4	51.3	57.4	53.8	55.0	53.4	55.5	55.3
Saudi Arabia	20.0	37.8	42.5	48.0	50.0	57.0	55.0	55.0	55.9	47.1	42.2
Mexico	33.2	35.1	34.5	35.4	35.4	34.6	35.0	39.8	42.4	42.8	42.8
Germany	32.1	30.4	29.9	33.5	32.4	31.5	32.1	31.1	32.7	34.0	33.7
Italy	39.8	36.3	34.4	33.1	26.2	23.1	21.4	20.8	19.3	19.3	19.3
France	19.1	18.1	18.0	19.4	18.0	17.5	16.4	15.6	15.9	16.9	16.5
South Africa	8.4	11.8	10.9	11.2	13.8	14.9	13.8	14.0	13.6	13.2	12.5
Canada	12.1	11.0	12.4	12.0	12.5	12.1	12.8	12.5	11.9	12.7	13.3
Argentina	5.5	9.4	10.4	11.6	10.7	11.9	11.8	12.2	10.9	12.0	11.8
United Kingdom	11.9	7.8	7.9	8.5	7.9	8.5	9.3	9.6	9.4	9.4	9.2
Australia	6.8	9.2	8.3	8.6	8.8	8.6	9.3	9.3	10.0	10.0	9.8

* EU28 data is compiled using latest available data
Sources: CEMBUREAU, US Geological Survey, Global Cement Report, Global Cement Directory

Ilustración 5- 3 Principales productores de cemento, fuente: (Cembureau, 2019)

EXPORTACIONES E IMPORTACIONES DE CEMENTO POR REGIONES (MILLONES DE TONELADAS)

Región	2016		2017		2018 E		2019 P	
	Exportación	Importación	Exportación	Importación	Exportación	Importación	Exportación	Importación
Europa	61,30	29,02	65,89	33,49	66,14	36,46	72,66	34,12
Norte de Asia	37,75	7,58	30,90	10,37	28,11	23,46	24,70	21,27
Medio Oriente	25,75	26,32	23,73	22,76	28,67	22,41	33,01	22,10
Sur de Asia	29,20	22,57	37,07	18,20	53,39	16,50	57,96	15,36
Subcontinente Indio	12,48	34,93	7,19	32,53	10,75	32,44	11,79	33,45
África	10,59	40,94	12,09	35,90	14,77	35,61	17,19	35,35
Norte América	5,09	12,89	4,87	13,36	5,64	14,67	5,58	15,07
Latinoamérica y el Caribe	4,58	8,96	6,20	9,99	5,67	10,12	5,77	9,65
Australasia	0,13	4,46	0,14	5,43	0,15	5,34	0,13	6,26
Total	186,87	187,67	188,08	182,03	213,29	197,01	228,79	192,63

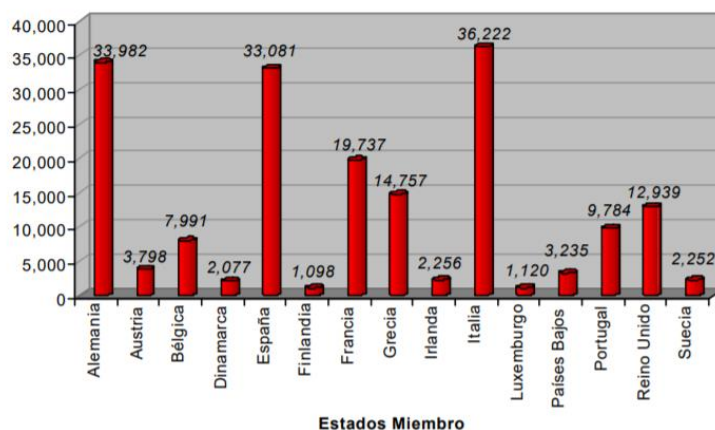
Fuente: International Cement Review
(E: valor estimado, P: valor pronosticado)

Ilustración 5- 4 Exportaciones e importaciones de cemento por regiones. Fuente:(FICEM, 2020)

Unión Europea

En la Ilustración 5.5 se presentan los principales productores de cemento de la UE, Italia (aprox. 36 millones de toneladas anuales), España (33 millones de ton anuales), Alemania (33 millones de Ton anuales) y Francia (19,7 millones de ton anuales). Según los relevamientos realizados, la producción de la UE no se ha incrementado sustancialmente en los últimos años; incluso se observa una tendencia a la baja. En la Unión Europea en 2008, había 268 instalaciones que producían clinker y

cemento, en 377 hornos de clinker (European Commission, 2010). En España (país cuyas Mejores Tecnologías Disponibles MTD son citadas en este estudio), hay 42 fábricas de cemento, con 62 hornos de clinker operativos y más de 100 molinos.



Miles de toneladas. Fuente: (Martinez, 2014)

Ilustración 5- 5 Producción de cemento por países en la UE, 1998.

En América Latina

Como se puede ver en la Ilustración 5.6, el principal productor de América Latina y el Caribe es Brasil (54 millones de Ton anuales), le sigue México (40 millones de Ton anuales), Colombia (12.5 millones de Ton anuales), Argentina (11 millones de ton anuales) y Perú (10 millones de Ton anuales). Uruguay tiene una producción del entorno de las 800.000 Ton anuales. Respecto al consumo en Latinoamérica, como se puede ver en la Ilustración 5.7, la primera posición la lleva Brasil (54 millones de Ton anuales), México (34 millones de Ton anuales), Colombia (12,5 millones de ton al año), Argentina y Perú 11 millones de Ton anuales. El consumo de Uruguay es del entorno de las 700.000 Ton anuales. Respecto al consumo per cápita de cemento, en la Ilustración 5.8, se observa que el valor oscila entre los 98 kg/hab y 476 kg/hab, siendo el promedio de 258 kg/hab. En Uruguay, este valor varió en los últimos años entre 230 kg/hab y 170 kg/hab (entre 2015 y 2019). A modo de ejemplo, y como comparación con relación a la posible variación de este indicador, se puede agregar que el consumo per cápita de China superó los 1000 kg per cápita en 2019.

PRODUCCIÓN DE CEMENTO (MILES DE TONELADAS)

PAÍS	2015	2016	2017 E	2018 E	2019 E	% Var 2016/2015	% Var 2017/2016	% Var (E) 2018/2017	% Var (E) 2019/2018
Argentina	12.193	10.899	11.960	11.842	11.082	-10,6	9,7	-1,0	-6,4
Barbados	208	nd	49,7	47,2	43,8	nd	nd	-5,0	-7,2
Bolivia	3.468	3.601	3.611	3.757	3.900	3,8	0,3	4,0	3,8
Brasil	65.283	57.557	54.004	53.602	54.390	-11,8	-6,2	-0,7	1,5
Chile	4.320	4.310	4.000	3.990	4.210	-0,2	-7,2	-0,3	5,5
Colombia	13.047	12.495	12.299	12.460	12.995	-4,2	-1,6	1,3	4,3
Costa Rica	1.550	1.220	1.364	1.340	1.220	-21,3	11,8	-1,8	-9,0
Cuba	1.520	1.490	1.430	1.590	1.640	-2,0	-4,0	11,2	3,1
Ecuador	5.860	5.550	5.690	5.760	6.270	-5,3	2,5	1,2	8,9
El Salvador	998	880	900	1.090	1.180	-11,8	2,3	21,1	8,3
Guadalupe y Martinica	394	362	349	359	371	-8,1	-3,6	2,9	3,3
Guatemala	3.004	2.900	3.180	3.260	3.512	-3,5	9,7	2,5	7,7
Haití (estimados)	632	645	768	807	742	2,0	19,1	5,0	-8,0
Honduras	1.700	1.840	2.140	1.960	1.840	8,2	16,3	-8,4	-6,1
Jamaica	808	nd	830	870	851	nd	nd	4,8	-2,2
México	39.600	42.367	41.836	42.805	39.900	7,0	-1,3	2,3	-6,8
Nicaragua	740	780	780	680	600	5,4	0,0	-12,8	-11,8
Panamá	1.970	1.900	1.920	1.670	1.470	-3,6	1,1	-13,0	-12,0
Paraguay	1.250	1.250	1.510	1.510	1.500	0,0	20,8	0,0	-0,7
Perú	10.764	10.094	9.980	10.049	10.574	-6,2	-1,1	0,7	5,2
Puerto Rico	514	450	400	560	550	-12,5	-11,1	40,0	-1,8
República Dominicana	5.181	5.171	5.254	5.430	5.640	-0,2	1,6	3,3	3,9
Suriname	102	97	53	46	52	-4,9	-45,4	-13,2	13,0
Trinidad y Tobago	840	nd	447	393	376	nd	nd	-12,1	-4,3
Uruguay	860	600	720	820	770	-30,2	20,0	13,9	-6,1
Venezuela	8.210	5.790	5.410	5.100	4.500	-29,5	-6,6	-5,7	-11,8
América Latina y El Caribe	185.016	173.718	170.885	171.797	170.179	-6,1	-1,6	0,5	-0,9

* E: Valor estimado

Ilustración 5- 6 Producción de cemento Latinoamérica y el Caribe. Fuente:(FICEM, 2020)

CONSUMO DE CEMENTO (MILES DE TONELADAS)

PAÍS	2015	2016	2017 E	2018 E	2019 E	% Var 2016/2015	% Var 2017/2016	% Var (E) 2018/2017	% Var (E) 2019/2018
Argentina	12.125	10.827	12.128	11.812	11.003	-10,7	12,0	-2,6	-6,8
Barbados	80	nd	71	68	63	nd	nd	-4,2	-7,4
Bolivia	3.417	3.633	3.602	3.722	3.957	6,3	-0,9	3,3	6,3
Brasil	65.316	57.784	53.703	52.940	54.400	-11,5	-7,1	-1,4	2,8
Chile	5.570	4.950	4.470	4.390	4.560	-11,1	-9,7	-1,8	3,9
Colombia	12.807	12.101	11.983	12.010	12.515	-5,5	-1,0	0,2	4,2
Costa Rica	1.410	1.290	1.375	1.350	1.200	-8,5	6,6	-1,8	-11,1
Cuba	1.430	1.490	1.420	1.540	1.590	4,2	-4,7	8,5	3,2
Ecuador	5.848	5.430	6.130	6.060	6.030	-7,1	12,9	-1,1	-0,5
El Salvador	945	956	1.034	1.266	1.464	1,2	8,1	22,4	15,6
Guadalupe y Martinica	394	362	349	359	371	-8,1	-3,6	2,9	3,3
Guatemala	2.954	3.000	3.252	3.432	3.697	1,6	8,4	5,5	7,7
Haití (Estimados)	1.581	1.612	1.661	1.565	1.406	2,0	3,0	-5,8	-10,2
Honduras	1.590	1.780	2.100	1.900	1.770	11,9	18,0	-9,5	-6,8
Jamaica	808	nd	881	952	952	nd	nd	8,1	0,0
México	39.100	41.500	41.630	41.160	39.000	6,1	0,3	-1,1	-5,2
Nicaragua	760	800	800	710	640	5,3	0,0	-11,3	-9,9
Panamá	1.980	1.900	1.920	1.672	1.470	-4,0	1,1	-12,9	-12,1
Paraguay	1.520	1.590	1.640	1.640	1.600	4,6	3,1	0,0	-2,4
Perú	10.850	10.152	10.168	10.724	11.089	-6,4	0,2	5,5	3,4
Puerto Rico	580	520	510	710	670	-10,3	-1,9	39,2	-5,6
República Dominicana	3.970	4.247	4.183	4.390	4.703	7,0	-1,5	4,9	7,1
Suriname	239	203	156	154	184	-15,1	-23,2	-1,3	19,5
Trinidad y Tobago	656	526	503	426	456	-19,8	-4,4	-15,3	7,0
Uruguay	800	580	610	750	680	-27,5	5,2	23,0	-9,3
Venezuela	8.140	5.690	5.140	5.010	4.400	-30,1	-9,7	-2,5	-12,2
América Latina y El Caribe	184.869	173.798	171.419	170.712	169.870	-6,0	-1,4	-0,4	-0,5

* E: Valor estimado

Ilustración 5- 7 Consumo de cemento por país en América Latina. Fuente:(FICEM, 2020)

CONSUMO DE CEMENTO PER CÁPITA (kg/hab)

PAÍS	2015	2016	2017 E	2018 E	2019 E
Argentina	289	248	275	265	245
Barbados	268	239	248	237	219
Bolivia	314	330	322	328	344
Brasil	319	279	261	253	258
Chile	309	272	243	234	241
Colombia	266	249	244	242	249
Costa Rica	294	263	278	270	238
Cuba	129	130	126	136	140
Ecuador	359	331	365	355	347
El Salvador	149	150	162	197	227
Guadalupe y Martinica	493	464	447	460	476
Guatemala	183	187	192	198	209
Haití (Estimados)	157	160	164	142	128
Honduras	190	188	230	192	182
Jamaica	297	ND	320	335	334
México	323	346	347	343	315
Nicaragua	127	130	130	110	98
Panamá	495	465	484	400	346
Paraguay	231	237	241	236	227
Perú	348	322	319	333	341
Puerto Rico	166	150	135	191	180
República Dominicana	396	400	391	418	428
Suriname	421	352	267	261	308
Trinidad y Tobago	486	382	363	307	327
Uruguay	230	170	175	217	196
Venezuela	270	195	170	173	155
América Latina y El Caribe	294	273	270	264	258

* E: Valor estimado

Ilustración 5- 8 Consumo per cápita de cemento fuente: (FICEM, 2020)

5.3. Generalidades de los procesos de obtención de clinker y cemento

El proceso tiene, en términos generales, las siguientes etapas, lo cual se presenta en la Ilustración 5.9.:

- a. **Obtención y preparación de materias primas:** Las canteras se explotan mediante voladuras controladas en el caso de materiales duros como calizas y pizarras, mientras que en el caso de materiales blandos (arcillas y margas) se utilizan excavadoras para su extracción.
- b. **Trituración:** Una vez extraído y clasificado el material, se procede a su trituración hasta obtener una granulometría adecuada para el producto de molienda y se traslada a la fábrica mediante cintas transportadoras o camiones para su almacenamiento en el parque de prehomogeneización.
- c. **Pre-homogeneización:** El material triturado se almacena en capas uniformes para ser posteriormente seleccionadas de forma controlada. La prehomogeneización permite preparar la dosificación adecuada de los distintos componentes, reduciendo su variabilidad.
- d. **Molienda de crudo:** Los materiales para la producción de clinker se muelen para reducir su tamaño y favorecer así su cocción en el horno. La molienda puede ser en seco o complementarse con el agregado de agua para la formación de pastas, en los procesos vía húmeda. Estas diferentes tecnologías de producción se describen más adelante, en este capítulo.
- e. **Pre calentador y alimentación del horno:** La alimentación al horno se puede realizar a través de un pre calentador de ciclones, o de un secador, donde se calienta el crudo para facilitar su cocción.

- f. Fabricación del clinker en el horno:** Los gases circulan en sentido contrario al avance de los materiales (contracorriente) y el flujo de los mismos está forzado por la aspiración de un ventilador o situado flujo abajo del horno, capaz de mantener todo el horno con una presión menor que la atmosférica (depresión). El proceso de formación de clinker se puede dividir en las siguientes cuatro etapas:
- Deshidratación y precalentado (20 – 900 °C): que consiste en secar y precalentar los materiales que componen el crudo.
 - Calcinación / descarbonatación (600 – 900 °C): se inician las reacciones y se forman los minerales y fases intermedias, que posteriormente acabarán dando lugar al clinker. Se descompone la caliza y se forma silicato dicálcico por la reacción endotérmica entre la sílice y el óxido de calcio formado en la descomposición de la caliza.
 - Sinterización o clinkerización (1.250 – 1.450 °C): Se forma el silicato tricálcico por la reacción exotérmica entre el silicato dicálcico y el óxido de calcio.
 - Enfriamiento interno en el horno (1.350 – 1.200 °C): Se produce la cristalización y formación definitiva del aluminato cálcico y del ferrito cálcico.
- g. Enfriador:** A la salida del horno, el clinker se introduce en el enfriador, que inyecta aire frío del exterior para reducir su temperatura de los 1.400 °C a los 100 °C. Por lo general se utilizan intercambiadores de calor aire-sólido, los cuales pueden ser de los siguientes tipos: de tubo rotativo, de satélites (planetario) o de Parrilla.
- h. Molienda de clinker y fabricación de cemento:** Una vez obtenido el clinker, se pueden obtener los distintos tipos de cemento mediante la molienda conjunta de clinker (en una proporción aproximada del 80 %), yeso y otros materiales, denominados adiciones (hasta completar el 20 % restante), en un molino de cemento. El yeso se utiliza como retardador del fraguado del cemento, con objeto de que los hormigones o productos con él fabricados mantengan un estado fluido durante el tiempo necesario para su aplicación. La molienda se realiza en distintos tipos de molinos, entre los que se pueden destacar: molinos de tubo, molinos de rodillo verticales, molinos de rodillos horizontales, prensas de rodillos. Las distintas proporciones de materiales y el grado de finura al que se muelen, da lugar a los distintos tipos de cemento, clasificados por la composición y por la categoría resistente, así como por otras consideraciones, como el tiempo de fraguado, la resistencia inicial, etc. Con estas adiciones también se persiguen ahorros en la proporción de clinker necesario en la formulación del cemento, siempre que esas adiciones tengan unas características que permitan sustituir dicho elemento.
- i. Almacenamiento del cemento:** El cemento se almacena en silos, separado según sus tipos o clases.
- j. Envasado o expedición a granel:** El cemento se ensaca o se descarga en un camión cisterna para su transporte por carretera o ferrocarril.

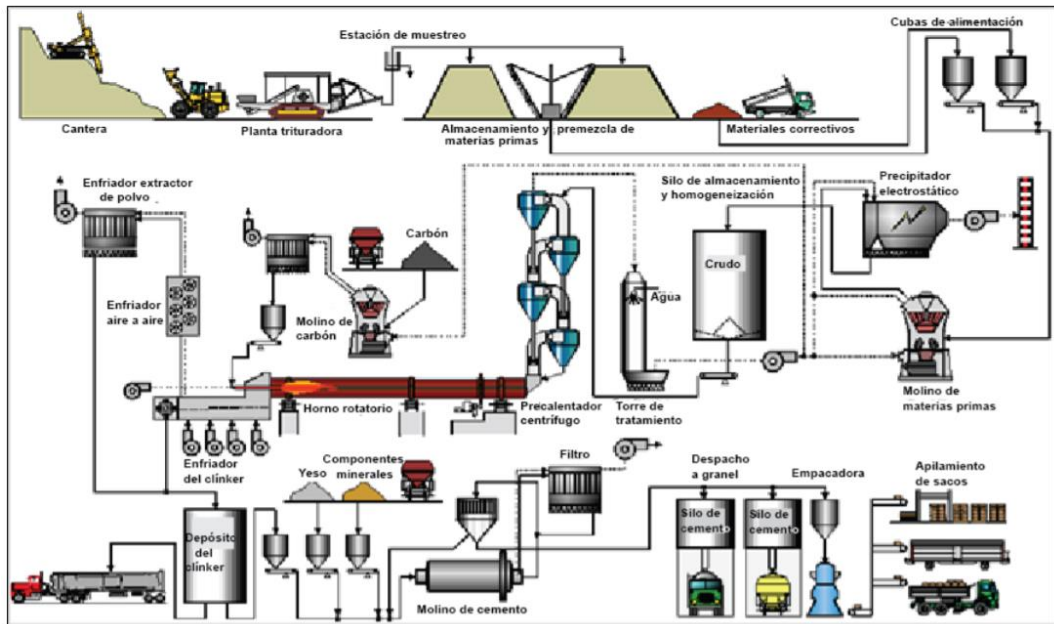


Ilustración 5- 9 Diagrama general de la producción de clinker y cemento, fuente: (Ambiente, 2019)

Este proceso, sobre todo en la etapa de clinkerización, requiere de una gran cantidad de energía, y genera emisiones que son liberadas por la chimenea principal, fundamentalmente debidas a la quema de los combustibles usados y la descarbonatación de la roca caliza. No obstante lo anterior, las altas temperaturas necesarias y el nivel de control requerido para el proceso, permite que estas unidades puedan ofrecer servicios ambientales, tales como la disposición final de residuos en condiciones adecuadas, las que no podrían realizarse en unidades de combustión convencionales, por los riesgos asociados a una quema ineficiente de determinados compuestos, con relación a las emisiones al aire. Mundialmente se utilizan los hornos de clinker para el co-procesamiento, valorización energética y destrucción de determinados materiales residuales, por ser esta la práctica más adecuada de disposición final desde el punto de vista ambiental para muchos residuos en diversos países. Esta posibilidad de diversificación de los materiales ingresados al horno, en forma controlada, torna a la industria cementera en un eje clave para el abordaje de oportunidades de economía circular.

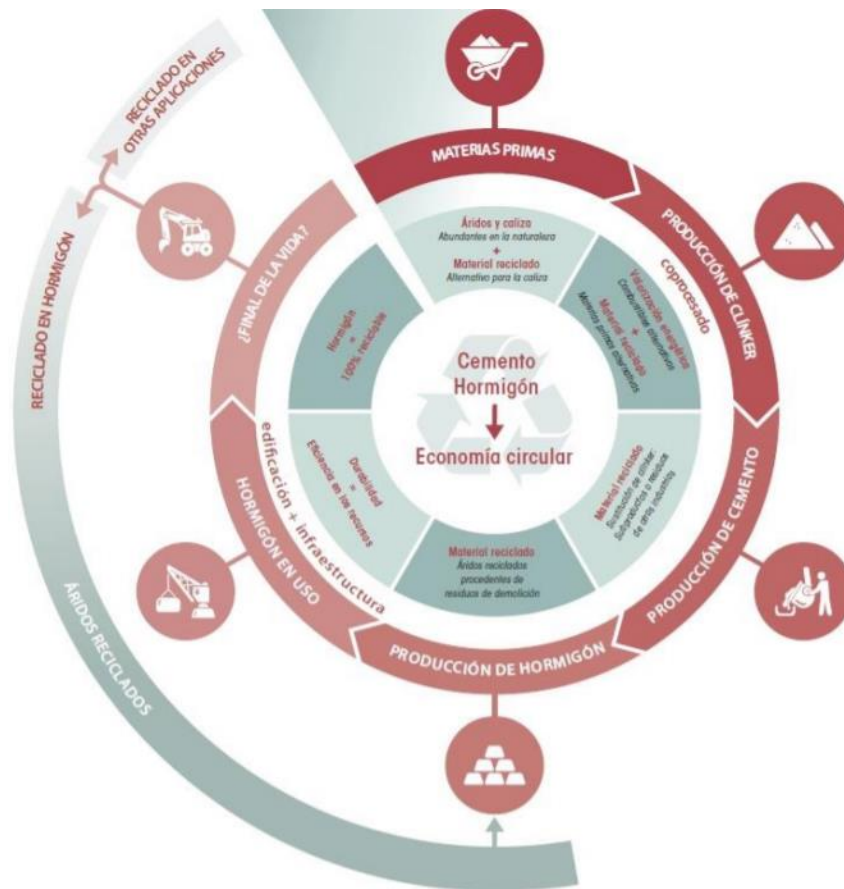


Ilustración 5- 10 Ciclo de vida de la fabricación de clinker, cemento y hormigones. Fuente: (Segovia, 2018)

En la Ilustración 5.10, se presenta el ciclo de vida del cemento con un enfoque no lineal, dividido en 6 etapas, ilustrando los conceptos del plan de acción de economía circular promovido por la Unión Europea para el sector construcción y demolición, donde la industria del cemento es un componente clave. En nuestro país, se vienen gestando proyectos y acuerdos apoyados por el Ministerio de Ambiente, que acompañan estas líneas de abordaje; las etapas se pueden describir como sigue:

- La obtención de materias primas a partir de materiales naturales extraídos desde las canteras, o bien, desde la adición de materiales reciclados alternativos a la caliza, que puedan ser adicionados en la etapa de precalentamiento y alimentación del proceso industrial de obtención.
- Producción de clinker, con el ingreso de las materias primas preparadas en punto 1 a la calcinación y clinkerización, donde se permite la posibilidad de incorporar para el coprocesamiento a materiales para su destrucción aprovechando su valor energético y/o químico, siendo ingresados en forma segura, al proceso como combustibles alternativos o materiales reciclados alternativos.
- Molienda del cemento, donde se tiene la posibilidad de molienda conjunta ingresando materiales reciclados que puedan sustituir al clinker, adicionándose subproductos o residuos de otras industrias que, por sus características, puedan mantener las propiedades del producto deseado, y quedar inmovilizadas en las estructuras a construir.
- Luego de producido el cemento, junto a la producción del hormigón, se pueden incorporar áridos reciclables procedentes de residuos de demolición.

- La durabilidad propia del hormigón en uso, permite sostener que el proceso tenga una alta eficiencia del uso de recursos, con el objetivo de producción de edificaciones e infraestructuras.
- Luego, hacia el fin de la “vida” del hormigón, si se propician las actividades mencionadas, los restos de demoliciones podrían ser reutilizados en la producción del hormigón mismo, o en otras aplicaciones posibles.

Todo lo anterior, contribuye a la visión de la industria cementera como un eje clave para el abordaje de las oportunidades de economía circular.

5.4. Tipos de tecnologías asociadas a la producción de clinker

Los procesos de obtención de clinker, se dividen según la forma de ingreso de la materia prima al horno de clinkerización, en 4 tipos de tecnologías, lo que se muestra en la Ilustración 5.11 y describe a continuación:

- Vía húmeda: las materias primas (generalmente con alto contenido de humedad), se muelen con agua para formar la “pasta” que tiene entre un 30 % y 40 % de contenido de agua, y la misma es alimentada en el extremo más elevado del horno inclinado. En la zona de secado del horno se suelen colocar cadenas, para mejorar el intercambio de calor entre los gases y la pasta.
- Vía semi-húmeda: La pasta de crudo, con alto contenido de humedad, es escurrida en filtros prensa u otro proceso de secado hasta un 15-20 % de humedad para formar pellets, o bien ingresa a un secador de tortas de filtrado, para alimentar luego a un precalentador antes del horno, o a un horno largo equipado con cadenas
- Vía semi-seca: La harina cruda y seca, se peletiza agregando agua hasta un 15-20 % de humedad, la que alimenta luego a un precalentador de parrillas antes del horno, o a un horno largo equipado con cadenas.
- Vía seca: las materias primas se introducen secas y en forma pulverulenta, conformando el crudo o harina que ingresa como polvo fluido al horno. La alimentación al horno se realiza mediante una torre de ciclones de varias etapas (generalmente de 4 a 6), para intercambio de calor, en la que se precalienta el crudo en contacto con los gases provenientes del horno rotatorio. A veces se instala una cámara de combustión donde se quema parte del combustible (puede llegar a ser el 60 % del total), llamada precalcinador, de manera que se consigue que el proceso de descarbonatación de la caliza (calcinación) quede casi completado antes de entrar en el horno.

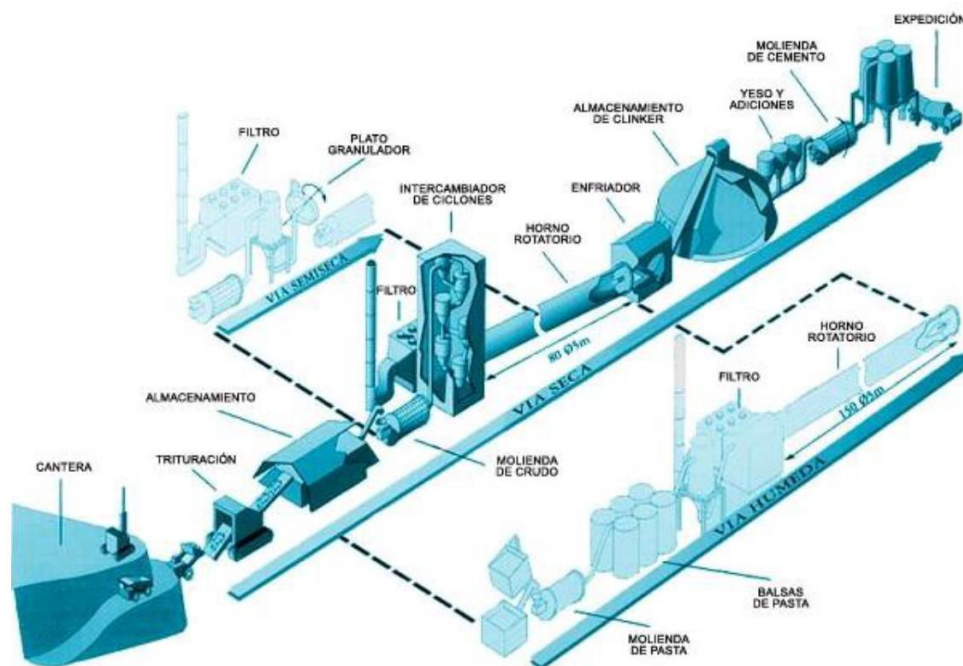


Ilustración 5- 11 Diagrama global diferencias de producción vía semiseca, seca y húmeda Fuente: (CER, 2001)

En la Ilustración 5.12, se presenta la evolución histórica de la eficiencia de los hornos de clinker, donde se aprecia tanto la eficiencia ganada en términos de energía, como el consiguiente ahorro en las emisiones de gases de efecto invernadero, por tonelada de clinker con el correr de los años.

Tipo de Horno	Año	Eficiencia (Kcal/kg. clk.)	CO ₂ combust. (Kg./t clinker)
Hornos de flecha	1880	3.000	1.900
Primeros hornos rotativos	1900	2.500	1.583
Primeros hornos vía húmeda	1940	1.500	950
Hornos vía húmeda modernos	1955	1.300	823
Hornos largos vía seca	1970	1.050	665
Hornos con precalentamiento	1975	850	538
Hornos con precalcinador	1980	800	507
Precalcinador con 40 % combustible	1995	750	380
Precalcinador con 60 % combustible	2000	725	298

Ilustración 5- 12 Evolución histórica de la eficiencia de los hornos de clinker en Europa. Fuente: (CER, 2001)

Históricamente se agregó agua al proceso, para favorecer el movimiento del material a ingresar al horno. Los hornos eran más largos para permitir el proceso de clinkerización y los requerimientos energéticos eran mucho mayores que los que corresponden a los procesos secos. Debido a que el costo energético que tienen las plantas de clinker corresponde aproximadamente al 30 % de los costos operativos, el proceso se ha venido tecnificando hacia la vía seca; los procesos por vía húmeda han dejado de ser competitivos.

En la ilustración 5.13, se presentan las características operativas de los procesos asociados a las emisiones generadas por las diferentes tecnologías y tipos de horno:

Tipo de proceso:		Seco			Semi-seco		Semi-húmedo		Húmedo	
Tipo de horno: Lepol = Horno con precalentador de parrilla móvil SP = Horno con ciclón precalentador PC = Horno con ciclón precalentador y precalcinador		Largo SP de 1 etapa SP de 2 etapas	SP de 4 etapas	PC de 4 etapas	Largo	Lepol	Lepol (3 cámaras)	SP y PC de 3 y 4 etapas con secador	Largo	PC de 2 etapas con secador
Características del horno	Alimentación	Crudo seco y pulverulento			Crudo peletizado		Torta de filtro		Papilla	
	Humedad (%)	0,5 – 1,0			10 – 12		16 – 21		28 – 43	
	Mecanismo de intercambio de calor	Cadenas y ciclón intercambiador	Ciclón intercambiador	Ciclón intercambiador	Cruces	precalentador de parrilla móvil	precalentador de parrilla móvil	Ciclón intercambiador	Cadenas y cruces	Ciclón intercambiador
	Capacidad del horno (t/d)	300 – 2800	300 – 4000	2000 – 10000	300 – 1500	300 – 2000	300 – 3000	2000 – 5000	300 – 3600	2000 – 5000
	Consumo específico de calor (GJ/t)	3,6 – 4,5	3,1 – 3,5	3,0 – 3,2	3,5 – 3,9	3,2 – 3,6	3,6 – 4,5	3,4 – 3,6	5,0 – 7,5	4,5 – 5,0
Características del gas de salida	Gases emitidos (Nm ³ /kg clinker seco)	1,7 – 2,0	1,8 – 2,0 / 2,2 – 2,4*	1,8 – 1,9 / 2,1 – 2,2*	1,7 – 1,8	1,9 – 2,1	3,4 – 4,0	2,1 – 2,3	2,2 – 3,2	2,1 – 2,3
	O ₂ en los gases de salida (% vol.)	4 – 5	8 – 9 / 9 – 11*	8 – 9 / 9 – 11*	4 – 5	6 – 10	12 – 14	8 – 10	4 – 5	5 – 6
	Temperatura entrada electrofiltro (°C)	150	150 / 100*	150 / 100*	200	100	100	120 – 150	180 – 220	120 – 150
	Punto de rocío (°C)	45 – 65			50 – 60		55 – 65		70 – 80	

* Operación directa / operación compuesta

Ilustración 5- 13 Características operativas de los procesos y hornos de clinker. Fuente:(CER, 2001)

5.5. Mejores técnicas disponibles

Según la Directiva 96/61/CE, se definen de la siguiente forma:

«mejores técnicas disponibles»: la fase más eficaz y avanzada de desarrollo de las actividades y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas para constituir, en principio, la base de los valores límite de emisión destinados a evitar o, cuando ello no sea practicable, reducir en general las emisiones y el impacto en el conjunto del medio ambiente. También se entenderá por:

- «técnicas»: la tecnología utilizada junto con la forma en que la instalación esté diseñada, construida, mantenida, explotada y paralizada;

- «disponibles»: las técnicas desarrolladas a una escala que permita su aplicación en el contexto del sector industrial correspondiente, en condiciones económica y técnicamente viables, tomando en consideración los costes y los beneficios, tanto si las técnicas se utilizan o producen en el Estado miembro correspondiente como si no, siempre que el titular pueda tener acceso a ellas en condiciones razonables;

- «mejores»: las técnicas más eficaces para alcanzar un alto nivel general de protección del medio ambiente en su conjunto.

Para el análisis vinculado con las MTD que se presentan en este trabajo, se consideraron los siguientes documentos:

- Procedimientos para instrumentar MTD de la UE: Documento Bref PRTR (Comisión Europea, 2012)
- Procedimientos para instrumentar la MTD (América del Norte EEUU y Canadá) (MJ Bradley & Associates, 2005).

- Proyecto de directrices sobre las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales (Colombia) (Ambiente, 2019).

Son varios los factores a considerar al elegir cuál de las opciones de control de emisiones representa la mejor tecnología disponible (MTD). Desde una perspectiva ambiental, la mejor opción es la que reduce al mínimo los niveles totales de emisión del contaminante en cuestión. Sin embargo, el uso de la opción más eficaz para el control de la contaminación no siempre es viable, debido al impacto económico, energético, ambiental o técnico que ésta pueda significar. Por lo anterior, se utiliza un proceso en cascada para determinar cuál tecnología o proceso sería el más adecuado para cada aplicación específica. Este método es relativamente simple, y puede reproducirse con facilidad para todos los contaminantes y fuentes; se resume en los siguientes 5 pasos:

Paso 1. Identificar las tecnologías de control posibles: El primer paso es un análisis para identificar todas las opciones de control disponibles, es decir, las tecnologías o técnicas de control de las emisiones con potencial práctico para aplicarse en la unidad y al contaminante sometido a evaluación. Las tecnologías y técnicas de control de la contaminación comprenden la aplicación de procesos de producción o métodos, sistemas y técnicas disponibles, incluidas técnicas de limpieza o tratamiento de combustibles, o técnicas innovadoras de combustión para el control del contaminante en cuestión, así como tecnologías utilizadas en otras partes del mundo.

Paso 2. Eliminar las opciones inviables: El segundo paso consiste en evaluar la viabilidad técnica de las opciones de control identificadas en el paso uno con respecto de los factores específicos para la fuente (o unidad de origen de las emisiones), y eliminar del proceso de análisis todas aquellas que no resultan viables desde el punto de vista técnico. La determinación de que una opción es inviable técnicamente tendría que documentarse en forma clara, demostrando —con base en principios físicos, químicos y de ingeniería— la existencia de dificultades técnicas que impedirían el uso exitoso de la opción de control.

Paso 3. Clasificar y ordenar las opciones viables: En el paso 3, todas las opciones de control que no fueron eliminadas en el paso 2 se clasifican y ordenan en función de su eficacia general para controlar las emisiones del contaminante en cuestión. Para cada contaminante y para cada fuente o unidad de emisión objeto del análisis, deberá integrarse una lista en la que se presente el conjunto de opciones viables en orden descendente (la alternativa más eficaz en primer lugar) y que incluya los siguientes datos:

- Reducciones en las emisiones (porcentaje del contaminante eliminado)
- Tasa de emisión prevista (toneladas por año, kilogramos por hora)
- Impacto en términos energéticos
- Impacto ambiental (incluye cualquier efecto significativo o inusual en otros medios, tales como agua o residuos sólidos, y sus efectos en contaminantes atmosféricos tóxicos o peligrosos)
- Impacto económico (rentabilidad). Un solicitante que proponga la primera alternativa de control de la lista no necesitará presentar los costos y demás información detallada del resto de las opciones. En tales casos, los solicitantes deberán comprobar, a satisfacción de la dependencia responsable de la revisión, que la opción elegida efectivamente es la primera del listado.

Paso 4. Evaluar la opción más eficaz: Luego de identificar las opciones de control disponibles y técnicamente viables, se evalúan los factores energéticos, ambientales y económicos asociados, a efecto de llegar al nivel final de control. En este punto el análisis presenta los impactos asociados

con las opciones de control incluidas en el listado. El impacto económico tiende a ser el factor más directo, en la medida en que los aspectos ambiental y energético a menudo pueden resolverse a partir de sistemas más caros.

La determinación de lo que es económicamente viable se obtiene mediante una evaluación subjetiva, caso por caso, que considere el ciclo del vida del equipamiento y los costos de producción. En muchos países, esto es realizado y determinado por la dependencia reguladora. El propósito es establecer un nivel aceptable del impacto del costo (dólares por tonelada anual de emisiones reducidas), que se determine como económicamente viable, pudiendo simplemente ser el valor que se haya acordado gastar en otra operación de proceso similar.

Paso 5. Seleccionar la MTD. En este punto deberá haberse elegido ya una opción como la mejor alternativa disponible y viable para la disminución de emisiones.

Es importante señalar que el nivel de control objetivo para la MTD es cambiante. A medida que las tecnologías de control de emisiones mejoren y los costos asociados a su implementación y mantenimiento disminuyan, se espera que las tasas de emisión consideradas para la MTD descendan gradualmente, lo cual constituye precisamente el objetivo de un programa MTD.

Luego de aplicarse los procesos anteriores en Europa, USA y Colombia, los resultados de las MTD para hornos de clinker concluyen lo siguiente:

La descripción de las mejores tecnologías disponibles para la producción ambientalmente sostenible de los hornos de clinker, se enfocan en la reducción de consumo de energía y la reducción de las emisiones al aire.

Al objeto de reducir el consumo de energía, la MTD Europea indica el uso de hornos de proceso seco con precalcificación y precalentamiento multietapas. La minimización de energía necesaria, reduce la quema del combustible utilizado para la combustión, evitando las emisiones derivadas de este ahorro energético.

Las MTD de Estados Unidos, también sugiere el uso de hornos de proceso seco con precalcificación y precalentamiento multietapas.

En Latinoamérica, Colombia elaboró una propuesta de MTD para el sector cementero y concluye con la selección de la misma tecnología de producción.

Estos documentos, plantean los sistemas de control de procesos y mitigación óptimos desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental, para mitigar los aportes de los diferentes contaminantes emitidos al aire, entre ellos el NO_x.

5.6. Emisiones de la producción de clinker y cemento

La extracción y mezcla de materias primas, tiene asociadas emisiones de partículas, ruidos y vibraciones, además de los efectos físicos de la presencia misma de la extracción y operación de maquinaria y transportes asociados, como principales aspectos ambientales y procesos a atender. Estas actividades de extracción, tienden a concentrarse en cercanías de la planta industrial que realiza la clinkerización. Se utilizan filtros de manga para extraer las partículas de los sistemas de transporte, los cuales suelen realizarse a través de cintas transportadoras cerradas, con devolución del material al proceso y riego de caminos para evitar las emisiones generadas por rodadura.

Otras emisiones de material particulado provienen de las chimeneas de enfriamiento, molinos de carbón y de cemento (en caso de tener ductos individuales de emisión), y suelen ser mitigadas con relativa facilidad, por filtros de manga.

Las emisiones contaminantes de la chimenea principal, consisten mayoritariamente en partículas y óxidos de nitrógeno, pero también contienen monóxido de carbono y podrían contener dióxido de azufre. Además de estos contaminantes, emiten importantes cantidades de CO₂ (Gas de Efecto Invernadero) y pueden emitir contaminantes en cantidades traza, como por ejemplo, metales contenidos en las partículas, así como restos de compuestos orgánicos sin quemar (solo para determinadas condiciones de puntos de ingreso de materiales, las que requieren mayores controles). Las emisiones de dióxido de azufre deben ser atendidas más que nada en situaciones de arranque, donde no hay alimentación de polvo crudo en el horno, ya que los procesos de intercambios químicos dados en la torre intercambiadora, son los que naturalmente mitigan estas emisiones de gases ácidos, en condiciones estables del proceso.

5.7. Emisión de NO_x desde una planta de clinker y su control:

Los óxidos de nitrógeno provienen de la combustión del combustible y se generan por dos mecanismos:

- Por efecto térmico sobre el nitrógeno molecular del aire
- Por el aporte de nitrógeno en el combustible

La contribución porcentual depende de las condiciones de combustión, el tipo de quemador y el tipo de combustible que se esté quemando. La formación térmica de NO_x es rápida para temperaturas en el entorno de 3000 – 3600 °F (1649 a 1982 °C).

Se observa que las variables operativas más importantes en la formación de NO_x térmico son la temperatura máxima del gas, el tiempo de residencia del gas en el pico de temperatura, y la relación de alimentación entre combustible y oxígeno (exceso de oxígeno).

Los óxidos de nitrógeno también se forman por un mecanismo alternativo, en el que el nitrógeno del aire reacciona con radicales de hidrocarburos disponibles en el combustible en la zona de combustión.

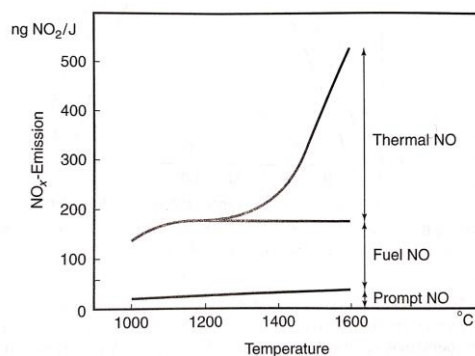
Éstos luego se combinan con radicales libres de OH para formar compuestos que son oxidados a NO, mediante una serie de pasos intermedios. Este mecanismo intermedio, genera NO que es conocido como NO inducido, cuyo aporte porcentual suele ser bajo.

La combustión a alta temperatura genera NO, en concentraciones de oxígeno disponible por encima de las 200 ppm y temperaturas superiores a los 1300 °C. A temperaturas debajo de los 760 °C, también se genera NO pero en menores concentraciones.

Si bien el nitrógeno contenido en el combustible (entre 0.5 y 2 % para el carbón), es bastante menor en cantidad porcentual comparado con el que trae el aire de combustión, éste es mucho más reactivo y, dependiendo de las condiciones de quema, puede contribuir en forma significativa al total de óxidos de nitrógeno finalmente emitidos.

Las acciones para promover atmósferas reductoras y disminuir el NO_x emitido, pueden generar concentraciones de CO peligrosas a los efectos de posibles explosiones, por lo que debe cuidarse que la concentración de este compuesto (CO) en el gas no exceda las 200 ppm, por motivos de seguridad.

En la Ilustración 5-14, se representa los aportes relativos al total de NO_x generado por la combustión del carbón:



NO_x térmico: El que se genera en caso de tener una relación estequiométrica apropiada entre el nitrógeno y el oxígeno, para temperaturas mayores a 1300.
 NO_x del combustible: generado como producto de la oxidación del nitrógeno previamente ionizado que contiene el combustible.
 Prompt NO_x: formado de las moléculas del aire en combinación con el aire rico en combustible.

Ilustración 5- 14 Aportes comparativos de los mecanismos de formación de NOx, provenientes de la combustión del carbón (Davis, 2000)

En el documento de las MTD Europeas (2010), se establece que para hornos rotatorios de cemento, el aporte en términos generales del combustible, es insignificante con relación a las emisiones totales producidas por efecto de la quema a altas temperaturas del nitrógeno del aire. El 95 % del NO_x en la emisión corresponde a NO y el 5 % restante a NO₂, pero todo el NO es convertido en la atmósfera a NO₂, dada la dinámica de estos óxidos.

En el precalcinador las temperaturas de entre 850 y 950 °C, no llegarían a formar cantidades significativas de NO₂ térmico, pero en esta zona quizás sí haya un aporte importante del NO generado de la quema del combustible en ese punto, en términos porcentuales. En caso de realizar quema de combustibles secundarios sobre la parte final del horno, posibles incrementos locales de la temperatura por sobre los 1050 °C, pueden generar un aporte adicional de NO_x térmico.

Se ha establecido que, en algunos casos, la generación de condiciones reductoras de quema de materiales residuales en el horno, ha logrado disminuir la emisión final de NO_x, al igual que la introducción de una mayor proporción de agua e ingreso de aire en la llama podría tener un efecto de enfriamiento que permita bajar el NO_x generado.

En la ilustración 5.15, se presenta una categorización por color y emisiones de NOx generadas, según el porcentaje de sustitución térmica de materiales alternativos que eran ingresados a cada horno, para las plantas consideradas en el estudio de las MTD de la Unión Europea, perteneciente a los países del G-27 (Commission, 2010).

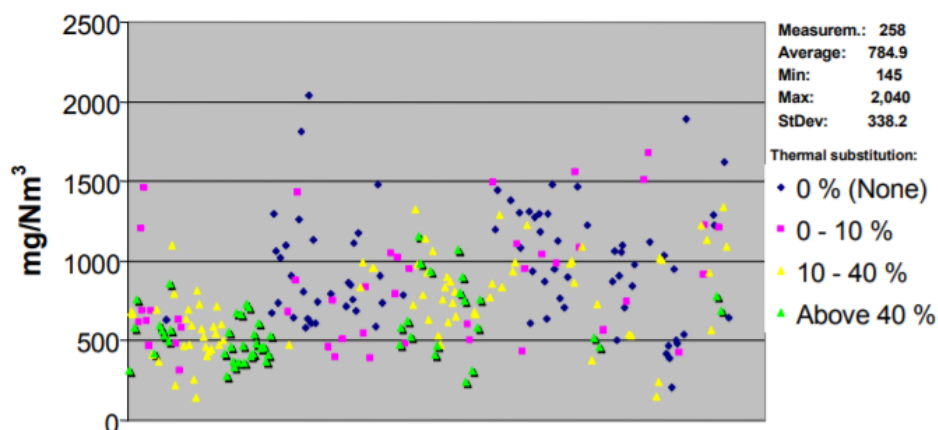


Ilustración 5- 15 Emisiones de NO_x desde hornos de clinker en la UE, según datos de 2004, categorizados según porcentaje de sustitución térmica del combustible utilizado, con relación al combustible tradicional. Fuente:(Commission, 2010)

5.8. Control de la emisión de óxidos de nitrógeno

Los métodos para mitigación de las emisiones de NO_x, consisten en controlar las condiciones de la combustión con el objetivo primario de evitar la generación, y luego usar métodos de post-combustión, con el objetivo de retirar el NO_x después de formado.

Minimización de la producción de NO_x, controlando la combustión:

Dentro de los métodos de control de combustión, los principios a seguir son los siguientes:

- 1) Reducción del pico de temperatura en la zona de combustión, operando la zona primaria de la llama bajo condiciones ricas en combustible, enfriamiento rápido de la llama a alta tasa y bajando la temperatura de la llama adiabática por dilución.
- 2) Reducción de la residencia del gas en zonas de alta temperatura
- 3) Operar en ausencia de la relación estequiométrica, usando una relación alta de combustible/aire en la llama primaria y bajo condiciones bajas de exceso de aire en general.

Estos principios se han conseguido materializar e implementar en diversos diseños de quemadores de bajo NO_x, con los cuales se logra una reducción importante de las emisiones. A continuación en la Ilustración 5.16, se muestra un esquema de un quemador que fue diseñado específicamente con este fin.

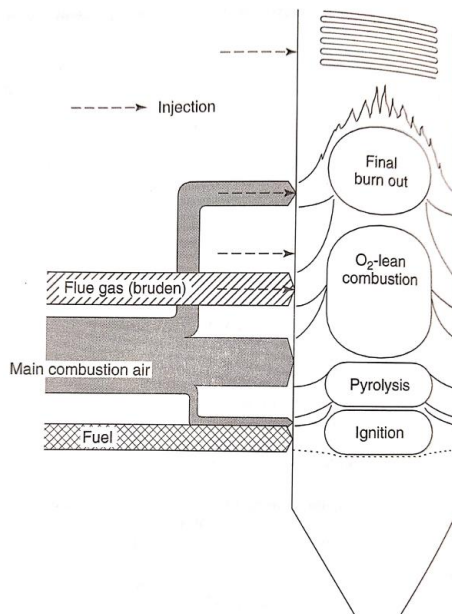


Figure 23. Low NO_x-Combustion (scheme) (from Ref. 27).

Ilustración 5- 16 Ejemplo de diseño, quemador de bajo NO_x, fuente: (Davis, 2000)

Absorción química

Esta técnica consiste en la absorción de los NO_x mediante una reacción química en fase líquida. El reactivo mayormente utilizado para su absorción es el ácido sulfúrico. Éste reacciona con los óxidos de nitrógeno para formar la especie HSO₄NO (ácido nitrosilsulfúrico), la cual permanece en la fase líquida. En condiciones de elevada presión (2 atm) y baja temperatura (35 °C), los NO_x quedan absorbidos en la fase líquida. En cambio, se puede revertir el proceso a elevada temperatura (180 °C) y baja presión (0,5 atm); en estas condiciones, se separa la molécula nitrogenada (ahora ácido nítrico, por la presencia de agua) del ácido sulfúrico, el cual se puede reutilizar. Este proceso presenta la desventaja de que se deben manipular reactivos químicos corrosivos y peligrosos, a la vez que se requiere espacio físico para albergar el proceso. Las eficacias conseguidas no son elevadas, por lo que la técnica es recomendable para bajas cargas de NO_x. Se desconoce aplicaciones exitosas de este principio, para la depuración en las emisiones de NO_x de plantas de clinker.

Reducción mediante reducción selectiva no catalítica (SNCR)

Esta técnica permite la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno mediante su conversión en nitrógeno gas, vía una reacción química no catalítica. Para llevar a cabo esta conversión sin la presencia de ningún catalizador, es necesario subir la temperatura dentro del rango 850-1100 °C. La temperatura de operación depende directamente del agente reductor que se utilice, siendo los más utilizados amoníaco o urea.

Es una técnica aplicada con éxito en plantas de clinker del mundo, pero se suele utilizar en pequeñas calderas industriales, ya que en instalaciones de mayor tamaño se disparan los costos de trabajar en este rango de temperaturas. El equipo de SNCR no requiere un gran espacio y es de fácil instalación y operación. No obstante, la eficiencia de reducción que se alcanza es moderada.

Reducción mediante reducción catalítica selectiva (SCR)

Esta técnica se basa en un proceso catalítico en el que se reducen de forma selectiva los óxidos de nitrógeno en presencia de un catalizador mientras que el agente reductor (amoníaco o urea), se oxida a nitrógeno gas. El hecho de que la reacción de reducción se lleve a cabo sobre la superficie del catalizador, hace posible que la temperatura necesaria esté comprendida en el rango 250-450 °C. La temperatura de operación acabará dependiendo de varios factores, siendo el catalizador utilizado uno de los parámetros claves.

El agente reductor, en la práctica, puede ser una disolución acuosa de amoníaco, amoníaco licuado o bien una disolución acuosa de urea. De todas ellas, la utilización de amoníaco licuado es la opción más económica, hecho que se traduce en costos de operación inferiores. Pero por otro lado, la manipulación de amoníaco licuado es mucho más compleja, que la de una solución acuosa de amoníaco o de urea, debido a sus características. El uso, almacenamiento y transporte de amoníaco licuado está sujeto a normas vinculadas con productos peligrosos y debe ser utilizado siguiendo un estricto protocolo de seguridad, debido al riesgo que supone el hecho de ser muy corrosivo y explosivo en presencia de oxígeno.

A nivel de operación, como mayor sea la relación NH_3/NO_x alimentada, mayor será la eficiencia conseguida. No obstante, también aumentará la cantidad de amoníaco que no ha reaccionado y que se desaprovecha en la corriente de gases. Esta pérdida de amoníaco sin reaccionar debe ser minimizada, ya que éste reacciona en presencia de agua con el SO_3 , para producir bisulfato de amonio (NH_4HSO_4), el cual es corrosivo y puede producir incrustaciones en las instalaciones. La clave de una operación óptima es la alimentación de amoníaco de forma tal que se consiga un buen rendimiento a la vez que se minimiza la cantidad de amoníaco no reaccionado.

La elección del catalizador es determinante en el proceso, ya que influye en parámetros claves como son la temperatura de operación y la extensión de la reacción. Existen cuatro materiales diferentes utilizados como catalizadores:

1. Óxidos metálicos (de vanadio, tungsteno, molibdeno o cromo) sobre base de dióxido de titanio (TiO_2)
2. Zeolitas
3. Óxidos de hierro recubiertos por una fina capa de fosfato de hierro
4. Carbono activo

La elección del catalizador también condiciona directamente los costos de operación, ya que no todos tienen las mismas propiedades, costo y vida útil. La principal ventaja de la tecnología SCR es el rendimiento de eliminación del NO_x , que es de los más altos alcanzados, además de que se transforman los NO_x en nitrógeno gas, sin producir ningún subproducto ni residuo.

De acuerdo a la experiencia internacional, la tecnología más eficiente para reducir las emisiones de Óxidos de Nitrógeno (NO_x) corresponde a la Reducción Catalítica Selectiva (SCR), la que puede alcanzar eficiencias de remoción entre 90 al 98 %.

MTD europeas para reducción de emisiones de NO_x en plantas de clinker:

Con el objetivo de reducir las emisiones de NO_x de los gases producidos durante los procesos de combustión, precalentamiento o precalcificación en hornos, la MTD consiste en aplicar alguna de las técnicas siguientes, o una combinación de ellas, lo cual se puede ver compilado en la Ilustración 5.17:

A. Aplicabilidad a Técnicas primarias

- I. Enfriamiento de llama. Aplicable a todos los tipos de hornos utilizados en la industria cementera. El grado de aplicabilidad puede verse limitado por los requisitos de calidad del producto y los potenciales efectos sobre la estabilidad del proceso.
 - II. Quemadores de bajo NO_x. Aplicable a todos los hornos rotatorios, tanto en el quemador principal como en el precalcinador.
 - III. Combustión a mitad de horno. Aplicable con carácter general a los hornos rotatorios largos
 - IV. Adición de mineralizadores para mejorar la cocción del crudo (clínker mineralizado). Aplicable con carácter general a los hornos rotatorios, respetando los requisitos de calidad del producto final.
 - V. Optimización del proceso. De aplicación general a todos los hornos.
- B. Combustión por etapas (combustibles convencionales o combustibles derivados de residuos), también en combinación con un precalcinador y una mezcla de combustibles optimizada. En general, solamente puede aplicarse en los hornos equipados con precalcinador. En los sistemas de precalentamiento de ciclones sin precalcinador, se requieren importantes modificaciones de la planta. En los hornos sin precalcinador, la utilización de combustibles en grano podría influir positivamente en la reducción de los NO_x, dependiendo de la capacidad de crear una atmósfera de reducción controlada y de controlar las correspondientes emisiones de CO.
- C. Reducción no catalítica selectiva (SNCR) en un punto a más de 1000 °C. Aplicable, en principio, a los hornos de cemento rotatorios. Las zonas de inyección varían según el tipo de proceso de fabricación. En los hornos largos de vía seca o vía húmeda puede que resulte difícil alcanzar la temperatura y el tiempo de retención necesarios.
- D. Reducción catalítica selectiva (SCR). Su aplicabilidad dependerá del desarrollo de los catalizadores y procesos apropiados en la industria cementera.

Table 2. NOx Control Methods ^{6,7}

Abatement or Emission Control Principle or Method	Successful Technologies	Pollution Prevention Method (P2) or Add-on Technology (A)
1. Reducing peak temperature	Flue Gas Recirculation (FGR) Natural Gas Reburning Low NOx Burners (LNB) Combustion Optimization Burners Out Of Service (BOOS) Less Excess Air (LEA) Inject Water or Steam Over Fire Air (OFA) Air Staging Reduced Air Preheat Catalytic Combustion	P2 P2 P2 P2 P2 P2 P2 P2 P2 P2 P2
2.Reducing residence time at peak temperature	Inject Air Inject Fuel Inject Steam	P2 P2 P2
3. Chemical reduction of NOx	Fuel Reburning (FR) Low NOx Burners (LNB) Selective Catalytic Reduction (SCR) Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR)	P2 P2 A A
4. Oxidation of NOx with subsequent absorption	Non-Thermal Plasma Reactor Inject Oxidant	A A
5. Removal of nitrogen	Oxygen Instead Of Air Ultra-Low Nitrogen Fuel	P2 P2
6. Using a sorbent	Sorbent In Combustion Chambers Sorbent In Ducts	A A
7. Combinations of these Methods	All Commercial Products	P2 and A

Ilustración 5- 17 fuente:(Commission, 2010).

5.9. Revisión de estándares internacionales de emisión para NO_x

Los estándares de emisión establecidos para NO_x dependen del rubro emisor y el país en cuestión; en algunos países se determinan las cargas máximas admitidas caso a caso. En la Ilustración5-18, se presenta una recopilación de valores normativos internacionales establecidos para las emisiones de NO_x. En ella se observa que los valores expuestos en el Decreto 135/021, no son los más restrictivos de la región:

País/ Región	Año	VLE (mgNOx-NO2/Nm3)	%O2	Valor del estándar al 7% (ordenado)	Obs
UE 13005	1990	2291	7	2291	c/aprovechamiento térmico
UE 13005	1990	1655	7	1655	s/aprovechamiento térmico
Mexico	2002	1600	7	1600	Resto del País
Uruguay	2020	1400	7	1400	F existentes
Brasil	2007	1000	10	1273	F existentes
Colombia	2008	800	11	1120	F existentes
UE Directiva 75/2010	2010	800	10	1018	Tolerancia hasta 2016
Brasil	2007	800	10	1018	F nuevas
Argentina - Córdoba	2017	450	14	900	Para combustión, en "condiciones de chimenea"
Uruguay	2020	850	7	850	F nuevas
Colombia	2008	600	11	840	F nuevas
Brasil	2006	650	10	827	
Mexico	2002	800	7	800	Zona Metropolitana de la Ciudad de México
IFC Clinker y cal	2007	600	10	764	
UE Directiva 75/2010	2010	500	10	636	Valor luego de 2016
Alemania	2002	500	10	636	

Ilustración 5- 18 Tabla relevamiento de normativas internacionales

6. Producción de clinker y cemento en Uruguay

6.1. Tipos de cemento en Uruguay

La norma UNIT 20:2003 define al cemento Portland como un conglomerante hidráulico constituido por clinker Portland y demás componentes en proporciones definidas, que pueden ser molidos en conjunto o por separado en planta de cemento o dependencias. Se le adiciona sulfato de calcio como regulador de fraguado y, eventualmente, aditivos.

Si bien el cemento comercializable hoy por hoy en Uruguay es en su amplia mayoría el denominado cemento portland normal CPN (aquel con un contenido de clinker portland igual o superior al 95 %, similar al Tipo I de España), la norma UNIT 20:2008, estandariza la producción de otros tipos de cementos, y presenta alternativas viables de cementos con agregados de otros materiales (Hidalgo, 2015). La producción de cementos puzolánicos u otros, en Uruguay, es un asunto abierto que genera diversos tipos de proyectos y estudios vinculados con esta producción, pero por el momento no se encuentran implementaciones a escala industrial y el CPN continúa siendo el producto comercializado.

En ilustración 6.1. , se presenta la clasificación de los diferentes tipos de cementos de acuerdo con su composición y porcentaje de componentes principales y minoritarios.

TIPO DE CEMENTO	DESIGNACIÓN	Composición (g/100g)				
		Componentes principales				Componentes Minoritarios
		Clinker	Puzolana (P)	Escoria (E)	Filler Calcáreo (F)	
Cemento pòrtland normal	CPN	100-95				0-5
Cemento pòrtland con filler calcáreo	CPF	94-80			6-20	0-5
Cemento pòrtland puzolánico	CPP	85-50	15-50			0-5
Cemento pòrtland con escoria	CPE	94-65		6-35		0-5
Cemento pòrtland compuesto	CPC	94-65	Dos o tres componentes Con P +E+F entre 10y 35%			0-5

Ilustración 6- 1 Tipos de cemento Fuente:UNIT 20:2003

En la norma también se presentan los requisitos mecánicos, físicos y químicos que deben cumplir los diferentes tipos de cementos, así como las normas de referencia para realizar los ensayos.

A continuación se presenta, a modo de ejemplo, los requisitos para los posibles Cementos Portland Compuestos, en las Ilustraciones 6.2 a 6.4:

Categoría	Resistencia a la compresión (Mpa)				Ensayos de referencia
	2 DIAS	7 DIAS	28 DIAS		
CP 30		Mín. 16	Mín. 30	Máx. 50	UNIT-ISO 679:2009
CP40	Mín. 10		Mín. 40	Máx. 60	
CP 50	Mín. 20		Mín. 50		

Ilustración 6- 2 Requisitos mecánicos. Fuente UNIT 20:2003.

Físicos	Método de ensayo	Requisito
Finura: Superficie Especifica	UNIT-NM 76	Mínimo 250 m ² /kg
Constancia de vol.: Expans. en autoclave	UNIT 514	Máximo 0,90%
Tiempo de fraguado: Inicial Final	UNIT-NM 65	Mínimo 45 min Máximo 10 hrs.

Ilustración 6- 3 Requisitos físicos. Fuente UNIT 20:2003

Químicos	Método de ensayo	Requisito
Trióxido de azufre	UNIT-NM 16	Máximo 3,5
Cloruros	UNIT 1013	Máximo 0,10 g/100 g
Sulfuros	UNIT-NM 19	Máximo 0,50 g/100 g

Ilustración 6- 4 Requisitos Químicos. Fuente UNIT 20:2003.

6.2. Empresas y producción nacional

En la actualidad hay seis empresas que comercializan cemento portland en nuestro país. Tres de ellas (las principales en tamaño), producen tanto clinker como cemento. La tercer empresa productora de clinker y cemento, comenzó a operar sobre el último trimestre de 2021. De las restantes, una produce el cemento que vende a partir de clinker nacional, y otras dos, importan clinker y cemento desde Turquía y Brasil para la producción de cemento.

6.3. Estadísticas

Las tendencias que se presentan con relación al cemento producido en nuestro país, fueron elaboradas por la Cámara de la Construcción del Uruguay en base a datos generados por el INE. Estas estadísticas se generan periódicamente, dado que este es un insumo indispensable para analizar la evolución del sector de la construcción.

Respecto a la producción nacional, se puede ver en la Ilustración 6.5, que hubo un máximo en la producción de cemento de 978.000 Ton/año en 2011 y un mínimo de 600.000 Ton/año 2016. Analizando la Ilustración 6.6, se tiene que esta producción en su mayoría se genera para el mercado interno, y en la Ilustración 6.7, se puede notar que se tuvo un porcentaje de exportación máximo de 20 % durante 2011, y que el mismo ha variado, entrándose en 2019 en un 17 %. Los países a los que

se exporta son Argentina en primer lugar, luego Paraguay y por último Brasil, según la Ilustración 6.8.

Analizando la Ilustración 6.9, el valor de producción del cemento en moneda nacional se duplicó en los últimos 10 años, y el valor de producción en dólares en 2019 fue de aproximadamente 140 dólares por tonelada, tras haber alcanzado un pico de 181 dólares en 2013. En términos comparativos, en Latinoamérica el valor de producción de cemento más competitivo lo tiene Brasil, y el menos competitivo, Argentina; esto se representa en la Ilustración 6-10, donde se destacó con un recuadro la posición de Uruguay.

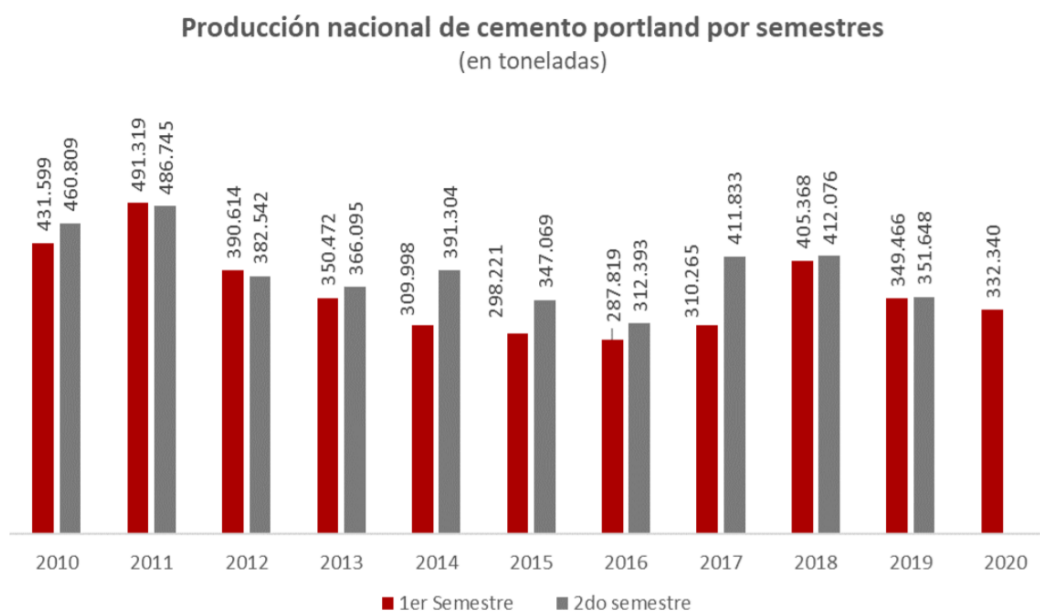


Ilustración 6- 5 Producción de cemento por semestre. Fuente: (CCU, 2020)

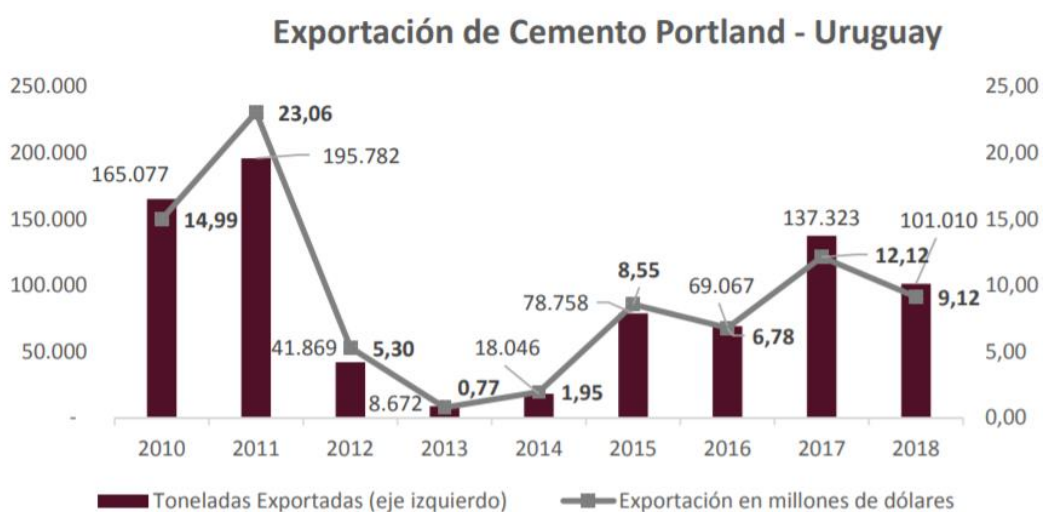


Ilustración 6- 6 Toneladas de cemento exportadas, fuente CCU 2019.

Participación de exportaciones de cemento portland en el total de producción nacional

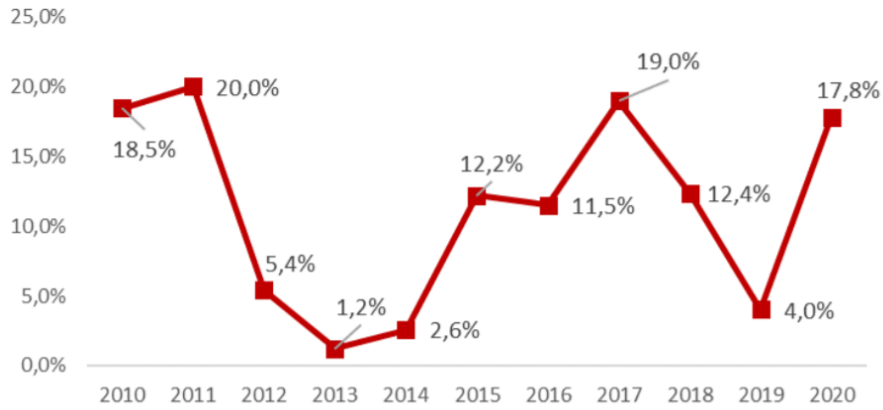


Ilustración 6- 7 Participación de exportaciones en el total de producción nacional. Fuente (CCU, 2020)

Exportaciones de cemento portland por destino (en toneladas)



Ilustración 6- 8 Destino de exportaciones

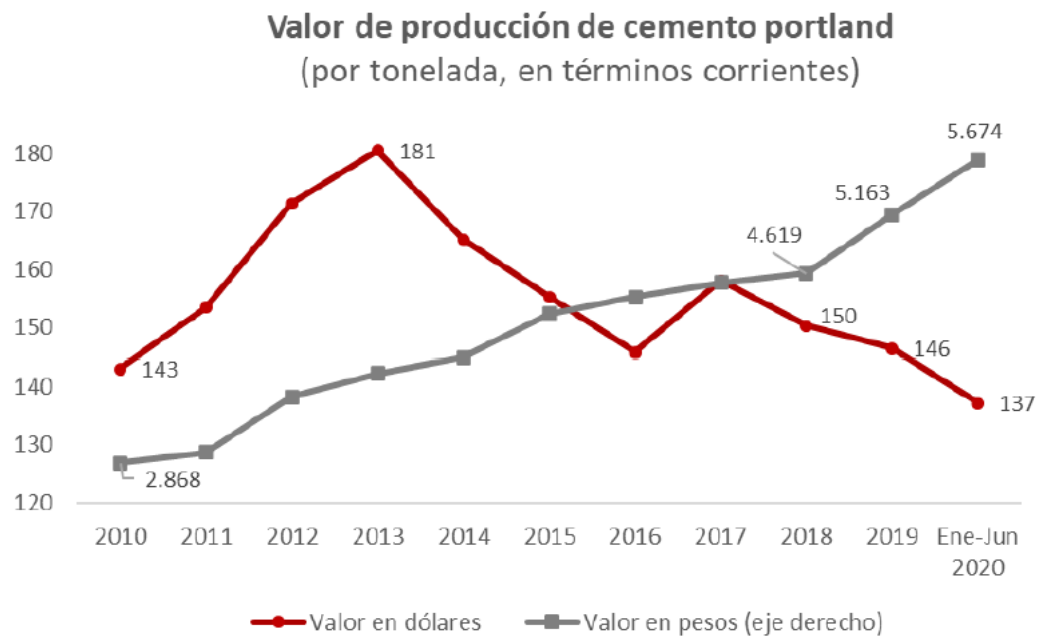
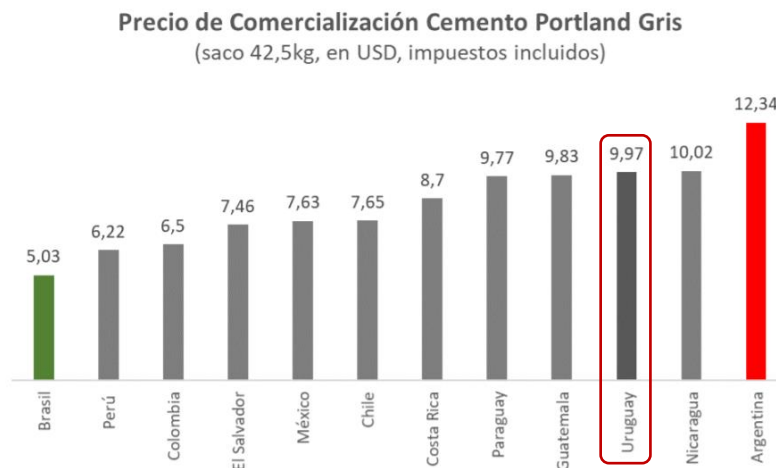


Ilustración 6- 9 Evolución del valor de producción en Uruguay. Fuente: (CCU, 2020)



Fuente: Elaboración CCU en base a FIIC

Ilustración 6- 10 Precio comparativo de comercialización en América Latina y el Caribe (CCU, 2020)

6.4. Tecnologías de producción y empresas objeto de estudio, instaladas en Lavalleja

Empresa 1

Esta empresa tiene una de sus plantas productoras de clinker y cemento hidráulico, ubicada en cercanías de la ciudad de Minas (Lavalleja). Su producción tiene como destino principal el

mercado interno y regional. Adicionalmente tiene un centro de distribución y logística en (Montevideo). La capacidad de producción de esta planta es de 300.000 toneladas anuales de clinker y 220.000 ton/año de cementos.

La planta cuenta con un horno rotativo de tecnología vía semiseca, FL Smith, con producción de pasta al 32% humedad y molino secador, precalentador de dos etapas de ciclones con calentador y precalcinador, y enfriador de bandejas cruzadas. La capacidad máxima de producción prevista es de 1000 Ton/d de clinker. El molino de cemento tiene una capacidad de 750 Ton/d, principal razón por la cual el horno de esta planta, no opera de continuo en el año.

Empresa 2:

Esta empresa, tiene un horno de clinker en cercanías de la ciudad de Minas, y una planta de molienda y despacho de cementos en Montevideo. Tiene un proyecto para la inclusión de una planta de molienda de cemento en la localidad de Minas, pero por el momento no está activa. El horno de clinker tiene una capacidad instalada de 1450 Ton/d y 460.000 Ton anuales. Éste, es un horno rotativo de tecnología vía seca, FLSmith fuller, con precalentador de ciclones de 5 etapas, con enfriador de parrillas y ventiladores de aire. El clinker generado, es transportado a la planta de Montevideo, para la molienda y comercialización del cemento.

6.5. Metodologías utilizadas para la evaluación de las emisiones de NO_x:

Se realizó una consulta al Ministerio de Ambiente, en el marco de la Ley de acceso a la información pública, y relevó los expedientes que corresponden a las Autorizaciones Ambientales de estas empresas. Particularmente se relevaron los expedientes físicos donde se describen las condiciones previstas en los proyectos previo a la instalación de los hornos operativos (Autorización Ambiental Previa y Autorización Ambiental Especial). Luego se relevaron los expedientes de las autorizaciones en la fase de operación (Autorización Ambiental de Operación).

En adición, se relevaron los datos existentes en el sistema de seguimiento de monitoreos continuos de la Oficina de Control Ambiental del Ministerio de Ambiente, habiendo accedido a una base de datos y los expedientes de seguimiento del desempeño ambiental, donde se encuentran los Informes Ambientales de Operación. La información analizada es la correspondiente al último año de operación disponible (2do semestre de 2020 y 1er semestre de 2021).

Cargas teóricas autorizadas y cargas objetivo

Se relevó especialmente la información vinculada con caudales de emisión previstos en el proyecto, así como las concentraciones establecidas, para el caso en el que no se disponía directamente de un valor de carga declarado en la autorización.

Las cargas objetivo, se establecen considerando que la emisión se da a la concentración de 850 mg/Nm³ al 7 % de O₂, acorde a lo expuesto para hornos nuevos, en el Decreto 135/021.

Evaluación de datos del Monitoreo Continuo

Se analizaron los datos de concentración y caudal de gases, provenientes de los reportes cada 10 minutos, realizados por estos emisores y enviados a DINACEA, durante el 2do semestre de 2020 y

el 1er semestre de 2021, en el marco de la consulta a la información pública (series de datos en planillas excel)

Se multiplicó la concentración promedio cada 10 minutos, por el caudal promedio en esos 10 minutos, y se sumaron los aportes de masa de NO_x liberada entre las 00:10 y las 00:00 del día siguiente, para calcular las cargas diarias emitidas. Con esto se elaboró una serie de datos anual con las cargas diarias liberadas al ambiente, para comparar con los valores límite considerados.

Evaluación utilizando datos de monitoreos discretos, reportados en los Informes Ambientales de Operación 2020 y 2021

Se tomaron los datos de las mediciones discretas dentro del período, realizadas por laboratorios especializados que fueron contratados por las empresas, los que reportaron tanto la concentración como el caudal de emisión. Se multiplicó el caudal y concentración determinados en el ensayo, para estimar la carga másica horaria emitida durante el monitoreo discreto. Suponiendo la representatividad de este valor con relación a la operación del horno, se extrapólo en el tiempo multiplicando la carga másica horaria, por las horas de operación reportadas por la empresa en estos informes, para completar la carga anual así obtenida con esta metodología.

Factores de emisión para NO_x

El uso de factores de emisión, se ha desarrollado para representar promedios de emisiones en largos períodos, típicamente anuales. Por lo anterior, se determinó para el período anual 2do semestre 2020 – 1er semestre 2021, un factor de emisión por nivel de actividad correspondiente a ese período, a partir de las cargas anuales calculadas con la metodología anterior y la cantidad de producción diaria nominal, considerando los días operativos del período.

Por otro lado, se calculó un “factor de emisión” asociado a las Autorizaciones Ambientales de Operación, considerando los valores de carga y producciones relevadas a partir de los expedientes de estas autorizaciones.

Por último, se compilaron factores de emisión para la producción de clinker provenientes de fuentes de referencia internacional como ser los del AP42 de EPA, los de la Guía de 2019 de la EEA¹³ (asociados al sector energético para la quema de combustible en plantas de clinker) y los descriptos en los documentos de las BATs de la Unión Europea para la producción de clinker, a modo de contar con otras referencias.

Comparación con emisiones asociadas al sector vehicular de Lavalleja:

Con el objetivo de comparar las emisiones calculadas con relación a las emitidas por el sector vehicular en la misma localidad de Lavalleja, se determinó un factor de emisión ponderado por tipo de combustible en Lavalleja, tomando las siguientes suposiciones:

- Se asumió el consumo de combustibles del departamento, como el correspondiente a las ventas anuales de gasolinas y gas oil por departamento¹⁴, publicados periódicamente por

¹³

http://efdb.apps.eea.europa.eu/?source=%7B%22query%22%3A%7B%22match_all%22%3A%7B%7D%7D%2C%22display_type%22%3A%22tabular%22%7D

¹⁴ <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/datos-y-estadisticas/datos/series-estadisticas-petroleo-derivados>

el Ministerio de Industria, Energía y Minería; la densidad de estos combustibles se tomó de la misma referencia.

- Con lo anterior, sumado a los factores de emisión provenientes de EMEP/EEA “air pollutant emission inventory guidebook 2019”, se estimó la emisión de NO_x producida por el consumo de combustible en Lavalleja anualmente.

Para vehículos de la categoría B y E: 33.37 gNO_x/kg gasoil.

Para vehículos de la categoría A y C: 8.73 gNO_x/kg gasolina.

Calculo de mitigación deseada de emisiones y estimación de costos:

El salto de mitigación necesario, se calculó como la resta entre el valor de emisión anual estimado, y el que tendrían los hornos si emitieran con una concentración de 850 mg/Nm³.

Posteriormente utilizando los costos aproximados de mitigación por kg removido de NO_x, los cuales se tomaron de los documentos elaborados por las BATs Europeas, se estimó un valor del costo de inversión y operación, en caso que estos hornos implementaran un sistema de reducción no catalítico de NO_x (SRNC), para abatir dichas emisiones.

7. Resultados y Discusión de resultados

7.1. Relevamiento documental, y cargas autorizadas

Emisor E1:

Para este emisor, se tiene en los documentos del proyecto de AAE, la información de caudal y concentración considerada para la emisión de NOx, lo que define una carga de emisión máxima autorizada (g/s). En la renovación de AAO, la empresa presentó una simulación con una carga y concentración determinadas, pero no detalló el caudal de emisión asociado.

Por otro lado, se recalcularon las cargas de emisión autorizadas en la AAO, suponiendo que la empresa cumpla con el valor de concentración de 1400 mg/Nm³ establecido en el Decreto 135/021 y el deseado para hornos nuevos y establecido en la AAE, de 850 mg/Nm³. Los resultados del relevamiento y cálculos indicados precedentemente, se presentan en la Ilustración 7.1

Fuente (año)	Relevamiento		Resultados suponiendo concentraciones D135/2021	
	AAE (2013)	AAO (2020)		
Caudal (Nm ³ /s)	108	-	-	-
Límite de concentración NOx, 7%O ₂ (mg/Nm ³)	850	-	1400	850
Supuesto (d/año)	330	330	330	330
Concentración de emisión (mg/Nm ³)	-	2240	1400	850
Carga autorizada (g/s)	91,8	90,0	56,3	34,2
Carga anual equivalente (Ton/año)	2617	2566	1604	974

Los valores sombreados, corresponden a cálculos.

Ilustración 7- 1 Cargas autorizadas, y resultantes en caso de reducciones en la concentraciones de emisión E1

Emisor E2:

En los documentos del proyecto presentado, disponible junto a la Autorización Ambiental Previa, se especificó el caudal horario y concentración límite de emisión, lo cual determina la carga másica autorizada en dicha instancia.

Posteriormente, en la AAO del emprendimiento, se especificaron dos concentraciones de NOx más restrictivas que la original, manejándose valores de 1400 y 850 mg/Nm³. Por lo anterior, se recalculó la carga resultantes para estas concentraciones, suponiendo que el caudal de emisión permanece constante. Lo anterior, se presenta en la Ilustración 7-2 a continuación.

Fuente	Relevamiento		Resultado suponiendo concentraciones D135/2021	
	AAP (2000)	AAO (2021)		
Caudal (Nm ³ /s)	98,4	98,4	98,4	98,4
Límite de concentración NO _x , 7%O ₂ (mg/Nm ³)	1800	1400	1400	850
Carga autorizada (g/s)	177,1	137,8	137,8	83,6
Supuesto (d/año)	330	330	330	330
Carga anual equivalente (Ton/año)	5051	3928	3928	2385

Los valores sombreados corresponden a supuestos y/o cálculos.

Ilustración 7- 2 Cargas autorizadas y resultantes en caso de reducción en la concentración de emisión E2

7.2. Estimación de cargas de emisión a partir del monitoreo continuo, y comparación con valores autorizados por empresa.

Los principales resultados obtenidos del análisis de las series de datos del monitoreo continuo, se presentan en la Ilustración 7.3. Las cargas anuales estimadas como la suma de las cargas diarias, se encuentran por debajo de las autorizadas. No obstante lo anterior, la concentración promedio diaria de emisión, supera sostenidamente el valor autorizado de 1400 mg/Nm³ para E1, y ocasionalmente se supera para E2. El promedio anual de E2, cumple con dicha concentración límite de emisión. Para ambos emisores, se excede el valor objetivo de 850 mg/Nm³ de concentración, considerado como valor límite objetivo de largo plazo, en los trámites relevados.

Por otro lado, el emisor E2, operó casi el doble de tiempo que el emisor E1 en el año, y tiene una capacidad mayor. Según los resultados, emitió algo más de 6 veces NO_x que E1.

Evaluación datos enviados al sistema de monitoreo continuo del MA		
	E1	E2
Cantidad de Datos con Emisor Activo	24680	43450
Días activo	170	309
[NO _x] diaria, promedio anual (mg/Nm ³)	1754	1156
[NO _x] diaria autorizada (mg/Nm ³)	1400	1400
Carga anual (Ton NO _x /año)	352,9	2361
Factor de emisión calculado (kg NO _x /Ton clinker producida)	2,08	5,27

Ilustración 7- 3 Resultados obtenidos a partir del sistema de monitoreo continuo

7.3. Emisiones extrapoladas en base a medición discreta anual, y reportes declarados en los informes ambientales de operación.

En los informes ambientales de operación semestrales presentados por los emisores entre junio de 2020 y junio de 2021 al Ministerio de Ambiente, cada empresa reportó un resultado discreto anual, conteniendo datos del monitoreo realizado en chimenea, por laboratorios externos. Se cuenta con un dato para cada emisor, que detalla concentración y caudal. Extrapolando el dato de carga obtenido a partir del monitoreo discreto presentado, y utilizando la cantidad de horas reportadas por semestre para estimar la emisión anual, se tienen los resultados que se presentan en la

ilustración 7.4 a continuación. Los resultados indican valores que sobreestiman las cargas con relación a lo monitoreado por el sistema de seguimiento continuo; más de 4 veces para E1 y casi 2 veces para E2.

Medición discreta en emisor:	Fecha	[NO _x] mg/Nm ³	caudal (Nm ³ /s)	carga (mg/s)	horas de operación 2do sem 2020	horas de operación 1er sem 2021	Carga anual estimada (Ton NO _x /año)
E1	4/3/2021	2587	40,4	104515	2486	1404	1464
E2	19/5/2021	2477	71,0	175867	3689	3691	4672

Ilustración 7- 4 Resultados obtenidos a partir de extrapolar medición discreta, y datos de reportes IAO

Lo anterior, apoya la necesidad expuesta en las MTD, de contar particularmente para este rubro, con un monitoreo continuo para la estimación de emisiones atmosféricas. Las diferencias observadas pueden justificarse en que aún en condiciones estables y controladas del proceso principal, pequeñas variaciones en la quema, pueden generar emisiones con concentraciones de contaminantes que presentan una variabilidad importante. Adicionalmente, las metodologías de medición implementadas, tanto en forma discreta como continua, tienen intrínsecamente asociados errores de determinación, que también aportan a los valores estimados de cargas.

7.4. Comparación de factores de emisión:

Los resultados de la evaluación por factores de emisión, se presentan en la Ilustración 7.5, ordenados en forma creciente, en conjunto con el relevamiento internacional. Los Factores de Emisión calculados para el último año de operación de ambos hornos, se encuentran significativamente por debajo de los factores de emisión implícitamente autorizados por el Ministerio de Ambiente, en los respectivos Estudios de Impacto Ambiental de las AAO. El factor de emisión del emisor E1, se corresponde con el que se espera de un horno con la tecnología instalada, según los datos de referencia utilizados para Estados Unidos, el cual es aproximadamente el doble o triple del que tendría un horno con las mejores técnicas disponibles europeas. El emisor E2 tiene un factor de emisión que supera el de E1, lo cual concuerda con lo esperable según las tecnologías instaladas. El valor calculado para el factor de emisión de E2, duplica el calculado para el horno E1, y supera los valores máximos de referencia internacional de emisión de NO_x por tonelada de clinker producida.

Referencia asociada al Factor de emisión	Fuente	FE (kgNOx/Ton Clinker)
Max Sistema de reducción catalítico (SCR)	BAT	0,23
minimo EEA	EEA	0,33
min Sistema de reducción no catalítico (SNCR)	BAT	0,40
Max Sistema de reducción no catalítico (SNCR)	BAT	1,15
min Sistema de reducción catalítico (SCR)	BAT	1,15
EEA	EEA	1,24
horno con precalentador y precalcinador	AP42	2,10
Emitido Empresa 1	UY	2,08
horno con precalentador	AP42	2,40
Medidas primarias / Equipo técnico económico	BAT	2,40
Proceso seco en hornos largos	AP42	3,00
Proceso húmedo	AP42	3,70
máximo EEA	EEA	4,67
Emitido Empresa 2	UY	5,27
Autorizado AAO Empresa 1	UY	7,77
Autorizado AAO Empresa 2	UY	8,21

EEA, refiere a la Agencia Europea de Ambiente, guía 2019; AP 42, a los factores de emisión de US-EPA.

Ilustración 7- 5 Factores de emisión de NOx por Ton Clinker.

7.5. Emisiones vehiculares en Lavalleja

Para esta estimación, se utilizó el total anual de combustible vendido en el departamento por las estaciones de servicio, asumiendo que el gasoil y gasolinas vendidas, se corresponden con vehículos que consumieron estos combustibles, dentro del departamento. Según la información disponible con relación a las ventas anuales, se tiene que el consumo de gasolinas se encuentra en un valor bastante estable, no así el de gasoil, pero igualmente se utilizó un valor promedio.

Las emisiones estimadas, se encontrarían en el entorno de una tercera parte, de lo que emitieron los principales emisores industriales de NOx en Lavalleja, valor comparable a lo que emitió anualmente el emisor E1; los resultados se presentan en la ilustración 7-6 a continuación.

	FE	Consumo anual m3	d (kg/L)	kg anual combustible	Emisión anual (Ton NOx/año)
Gasolina	8,73	16597	0,85	14107450	105
Gasoil	33,37	28357	0,84	23819880	795
				Total	900

Ilustración 7- 6 Estimación de emisión de NOx asociado al consumo de combustibles (Vehicular)

7.6. Mitigación necesaria y estimación de costos del sistema de abatimiento SRNC

Se calculó la mitigación teórica necesaria de NOx, como la resta entre la carga monitoreada por el sistema de monitoreo continuo, considerando la concentración promedio de emisión, y la carga que se desearía obtener, suponiendo una concentración promedio anual de 850 mg/Nm3. Los resultados se presentan en la Ilustración 7-7, los cuales muestran que la mayor exigencia de mitigación la tendría el horno de la empresa E2.

	E1	E2
Carga anual emitida (TonNOx/año)	352,9	2361,1
[NOx] diaria, prom. anual mg/Nm3	1754	1156
Carga deseada anual (TonNOx/año)	171	1736
Diferencia de carga a mitigar (TonNOx/año)	182	625

Ilustración 7- 7 Estimación de masa de NOx a remover (GAP).

Para la estimación preliminar de costos de la introducción de sistemas tipo SRNC en los hornos de clinker, se consideró los valores de referencia presentados en el documento de la MTD europea, el cual estima un costo de inversión fijo para hornos de envergadura similar a los instalados en Lavalleja, y proporcionan un valor de referencia para el abatimiento por kg de NOx removido. El costo operativo sería mayor para el horno E2, el cual tiene una tecnología más vieja instalada y mayores cargas a mitigar. Se calcularon también los incrementos asociados a las Toneladas de clinker producidas durante el período evaluado.

Los resultados se presentan en la ilustración 7-8, a continuación:

		EUR	USD
MTD Europeas 2010	Costo de inversión	600000	697295
	Vida útil de la instalación	35 años	
	Costo de abatimiento/ kg NO2 removido	0,74	0,86
E1	Cantidad NO2 a remover E1 (Ton/año)	182	
	Costo anual de remoción E1	135	156
	Producción de clinker anual (Ton) E1	170000	
	Incremento de costo/Ton clinker E1	0,79	0,92
E2	Cantidad NO2 a remover E2 (Ton/año)	625	
	Costo anual de remoción E2	462	537
	Producción de clinker anual (Ton) E2	448050	
	Incremento de costo/Ton clinker E2	1,03	1,20

Ilustración 7- 8 Estimación de costos asociados al sistema de abatimiento, a partir de costos de programa MTD.UE. (Commission, 2010)

8. Conclusiones

La calidad del aire influye en la salud de la población, y más del 90% de la población mundial que vive en ciudades, se encuentra respirando aire que no cumple con las directrices de calidad de aire de la OMS.

En ausencia de medidas de gestión, el crecimiento poblacional tiende a ir en detrimento de la calidad del aire, especialmente en los centros poblados, según la información internacional disponible.

En Uruguay, se estableció el derecho de los habitantes a vivir en un ambiente sano y equilibrado, lo cual motiva la necesidad de conocimiento de las situaciones locales con relación a la calidad del aire, y de promover acciones que tiendan a contar con un sistema de Gestión de la Calidad del Aire a nivel nacional.

En el país, hay esfuerzos coordinados desarrollados por varios actores, que posibilitan tener componentes marco para poder impulsar medidas de gestión de la calidad del aire. Se tienen experiencias adquiridas por diferentes entidades en materia de: inventarios de emisiones, análisis de causas de situaciones, modelados de dispersión, estándares primarios de calidad de aire, estándares de emisión, comparación con estándares de emisión y/o estándares de calidad de aire, medidas de control, estudios epidemiológicos/toxicológicos, y legislación general en la materia.

Sin embargo, aún hacen falta decisiones políticas para poder desarrollar una Gestión de la Calidad del Aire, que promueva una mayor coordinación de las acciones e información que es generada hoy en día de forma dispersa, por las diversas instituciones y actores involucrados.

Con el objetivo de propender al modelo de gestión internacional, aún falta afianzar y difundir los aspectos técnicos ya aplicados en casos particulares, así como desarrollar también espacios para incluir los siguientes componentes al marco conceptual existente: medidas de control de costos, definición de daños ideales o económicos, Inventarios de concentración de contaminantes del aire, análisis de causas, cálculos de los efectos ambientales no humanos, relaciones entre dosis-efecto y dosis-respuesta, estándares secundarios de la calidad del aire y cálculos de exposición de la población.

Entre 2020 y 2021, la GCA en Uruguay ha tenido avances junto a la creación del nuevo Ministerio de Ambiente, principalmente desde DINACEA y DINACC, las cuales están llevando a cabo trabajos en forma participativa con otros actores y a la interna, para desarrollar abordajes coordinados del factor aire en los próximos años. Lo anterior se percibe con la promulgación del Decreto 135/021 de Calidad de aire, la ejecución de numerosos talleres de difusión técnica, participación y sensibilización vinculados con la calidad del aire y el cambio climático, preparación y publicación de documentos técnicos de referencia, y planes estratégicos a implementar en los próximos años.

Los óxidos de nitrógeno, son el segundo contaminante de mayor interés por su necesidad de atención, según el monitoreo de calidad de aire implementados por la Intendencia de Montevideo, cuyos resultados se encuentran disponibles en la página web de la IdM. El de mayor interés, sería el PM_{2,5}, dado que es el que ha tenido mayor frecuencia de eventos con Índice de la Calidad del Aire en valores “inadecuados” o “malos”, durante 2017 y 2018, adoptando la nomenclatura del índice de calidad de aire definido por dicha institución.

El principal rubro emisor de NO_x en nuestro país, al igual que en el mundo, es el vehicular, afirmación que se puede sustentar en los inventarios existentes. Para el control de este contaminante, se tienen dos enfoques de gestión que suelen utilizarse internacionalmente, los cuales son complementarios. Uno desde el punto de vista de la protección de la calidad del aire circundante y vigilancia de estos estándares de calidad de aire (de NO₂ y Ozono), y otro enfoque, dado a nivel transfronterizo y de tratados internacionales, relativo a la reducción de la acidificación, de la eutrofización y del ozono en la troposfera, para lo cual se establecen cargas máximas de emisión a nivel país. Si bien este segundo enfoque aún no ha sido implementado en los países de Sudamérica, la necesidad de limitar la emisión de estos compuestos existe, y dado el porte de Argentina y Brasil, Uruguay podría ser uno de los más interesados en establecer tratados de este tipo, para evitar el ingreso de contaminantes transfronterizos al territorio.

El primer encare indicado en el párrafo anterior, es el tradicionalmente realizado en nuestro país en los últimos 20 años, particularmente con el sector industrial, cuyo abordaje se realiza en las autorizaciones otorgadas por el Ministerio de Ambiente, al establecer concentraciones máximas de emisión de contaminantes para los diferentes emisores puntuales, así como al establecer su vigilancia y vinculación con la calidad del aire del entorno.

Con la promulgación del Decreto 135/021, se tienen nuevos elementos de gestión a impulsar e implementar en Uruguay, con relación al sector vehicular (principal emisor de NO_x), ya que se establecieron limitaciones de las características de emisión de algunos motores de autos nuevos a importar, lo cual son elementos nuevos a integrar a la gestión. Vinculado también con el mayor sector emisor de NO_x, se están elaborando herramientas para promover la ejecución de Planes de Movilidad Urbana Sostenible a nivel de intendencias, así como la promoción del uso de autos eléctricos, a través de planes especialmente impulsados por el MIEM y la UTE, herramientas que son aliadas naturales para la gestión de la calidad del aire, ya que tienden a colaborar con la descongestión de las emisiones de escape.

Siguiendo con la visión por contaminante, para el NO_x, se tiene que el principal emisor es el departamento de Montevideo, lógicamente por el porte del sector vehicular. No obstante, localmente en el Departamento de Lavalleja, llama la atención que la situación es diferente, en tanto el rubro industrial es el principal emisor de Óxidos de Nitrógeno, representado en dos hornos productores de clinker, que generan más de 3 veces lo emitido por el parque vehicular de dicho departamento. Lo anterior, se corroboró con estimaciones de carga industrial y vehicular, utilizando factores de emisión e información pública consultada en el MA, sobre el desempeño ambiental de las empresas durante el último año, así como la información de ventas de combustibles correspondientes al 2020, publicada en la página web del MTOP.

En el caso de estudio, se ve que si bien las cargas anuales de emisión de NO_x de estos hornos cumplen holgadamente con las previstas en sus autorizaciones ambientales, no ocurre esto mismo con las concentraciones de emisión del contaminante, por lo que sería adecuado impulsar acciones de control sobre éstas emisiones, como medida eficaz para reducir la emisión de este contaminante en Lavalleja, además de las medidas que puedan implementarse sobre el rubro vehicular.

El exceso de NO_x emitido anualmente desde las fuentes industriales (debido a las concentraciones de emisión), sería comparable con lo que emiten las ventas anuales de gasoil de Lavalleja, siendo éste el combustible utilizado mayoritariamente por los vehículos pesados. La inversión necesaria para cumplir con el valor de concentración de emisión de 850 mg/Nm³ al 7%O₂, tiene un costo fijo de inversión, y otro asociado a los costos operativos, que asciende a USD 697.295 para E2. Si los costos operativos calculados fueran cargados al precio del clinker, éste se incrementaría en el

entorno de 1,2 USD por tonelada de clinker, lo cual representaría un 12% del valor de producción relevado para Uruguay. Esto podría implicar que el cemento pasara a ser el segundo cemento más caro de la región, luego del de Argentina, lo que podría ocasionar desbalances en la ecuación económica de ventas del producto.

Nuestro país cuenta con yacimientos de calizas y experiencias de más de 50 años de operación de plantas tanto públicas como privadas, para la producción de clinker y cemento, y se tienen tecnologías de producción y escalas que posibilitan la competitividad a nivel internacional. Se instaló una nueva planta en 2021, que se espera incrementará en un tercio la producción nacional, pasando el total anual a superar el millón de Toneladas. La producción de clinker y cemento de un país, es muy importante para la independencia y desarrollo de las infraestructuras, y así como un potente motor de la economía, que se vincula estrechamente con el sector de la construcción. No sería deseable imponer cambios drásticos que imposibiliten el desarrollo sustentable de esta producción, pero es un hecho que el Decreto 135/021 establece concentraciones de emisión por chimenea a cumplir, para proteger la calidad del aire circundante. Más allá de esta motivación para mejorar las mitigaciones existentes, el marco internacional define una tendencia a la elaboración de tratados para la reducción de la contaminación transfronteriza, y las emisiones de gases acidificantes del medio y precursoras de ozono y eutrofización. La gestión de este enfoque transfronterizo, se realiza atendiendo a la definición de cargas techo nacionales, asunto vinculado fuertemente con la Gestión de la Calidad del Aire, a modo de integrar la visión entre rubros y sectores prioritarios, desde el punto de vista de las emisiones nacionales de NOx.

Lo expuesto anteriormente, sería uno de los principales asuntos a atender para la gestión ambientalmente sostenible del NOx en el departamento de Lavalleja, resultado del estudio de caso realizado.

Se entiende que la metodología realizada en este trabajo, aborda una situación desde un punto de vista holístico a través del marco de gestión de la calidad del aire vigente en Uruguay, por contaminante y territorio, y puede ser un buen sustento metodológico y punto de partida, para emprender otros análisis de situaciones, para obtener medidas de gestión eficaces, a impulsar sobre otros territorios y parámetros.

9 Bibliografía

- Ambiente, M. de. (2019). *Proyecto de directrices sobre las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales Instalaciones de producción de Clinker*. Recuperado de: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Mejores_tecnicas_disponibles_y_las_mejores_practicas_ambientales_-_Introduccion.pdf - [21/2/22]
- Cataldo, J., Rezzano, N., D'Angelo, M., Deambrosi, M., Franchi, I., Hill, M., & Fernández, P. (2019). *Informe Final Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015*. Recuperado de: https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/Inventario_de_Emisiones_Atmosfericas_2015.pdf - [21/2/22]
- CCU. (2020). *Estudios económicos Cemento Protland*. Recuperado de: <http://ccu.com.uy/site/wp-content/uploads/2016/11/Informe-Cemento-Portland-Noviembre-2020.pdf> - [21/2/22]
- Cembureau. (2019). The European Cement Association, Activity Report 2018, Brussels. *The European Cement Association*. Recuperado de: <https://cembureau.eu/media/sn3fohjd/activity-report-2018.pdf> - [21/2/22]
- CER. (2001). *Cuadernos del CER N° 3 "Contribución de la industria del cemento a la gestión de residuos en Europa"*. Recuperado de: <http://istas.net/descargas/cemen7.pdf> - [21/2/22]
- Comisión Europea. (2012). *Guía Determinación MTD España 2.3.2012*. Recuperado de: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012D0119&from=ES> - [21/2/22]
- Commission, E. (2010). *Reference Document on Best Available Techniques in Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries*. (May). Recuperado de: <https://prtr-es.es/Data/images//BREF-cemento-revisado-aprobado-por-Comisi%C3%B3n-mayo-2010-.pdf> - [21/2/22]
- Davis, W. T. (2000). *Air Pollution Engineering Manual*. ISBN 0-471-33333-6
- Dietrich Schwela. (2009). *Gestión de la Calidad del Aire*. Recuperado (versión inglés) de: https://www.gtkp.com/assets/uploads/20091124-121718-1191-5a_AQM-new.pdf - [21/2/22]
- FICEM. (2020). *El cemento, El concreto*. Recuperado de: <https://ficem.org/revista-edicion-2020/> - [21/2/22]
- García-Gómez, H., González-Fernández, I., Vivanco, M. G., Calvete-Sogo, H., Bermejo-Bermejo, V., Valiño, F., ... Alonso, R. (2017). Depósito atmosférico de nitrógeno en España y evaluación del riesgo de efectos en los hábitats terrestres de la Red de Parques Nacionales. *Ecosistemas*, 26(1), 55–65. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-1.08>
- Hidalgo, P. (2015). *Evaluación de emisiones de carbono del cemento portland compuesto con ceniza de cáscara de arroz durante el proceso de fabricación* Tesis de maestría. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Arquitectura. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12008/8320> - [21/2/22]
- IdM. (2010). *Índice de Calidad de Aire (ICAire) - Marco conceptual y cálculos*. Recuperado de: https://montevideo.gub.uy/sites/default/files/biblioteca/icaire2010_0.pdf - [21/2/22]
- IDM, De Nigris, A., & Franco, P. (2017). Años 2017 Informe anual. Recuperado de:

- <https://montevideo.gub.uy/sites/default/files/biblioteca/2017.pdf> - [21/2/22]
- IDM, De Nigris, A., & Franco, P. (2018). Informe anual ICA 2018. Recuperado de: <https://montevideo.gub.uy/sites/default/files/biblioteca/informe2018.pdf> - [21/2/22]
- L. Marisquirena. (2019). Caracterización de riesgo toxicológico de un potencial contaminante químico NO₂.
- Larssen, S., Kanakia, R., Nygard, J., Dulal, H., Awe, Y., & Lee, H. (2015). Clean air and healthy lungs : enhancing the World Bank's approach to air quality management. (February), 1–130. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10986/21561> - [21/2/22]
- Galan Madruga, D., & Fernandez Patier, R. (2006). IMPLICATION OF THE NO_x IN THE ATMOSPHERIC CHEMISTRY. M+ A-REVISTA ELECTRONICA DE MEDIO AMBIENTE, 2, 90-103. Recuperado de: <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-41377/2006%20%20david%20galan%20y%20otro.pdf> - [21-02-22]
- Martinez, A. R. (2014). Estudio del sector cementero a nivel mundial y nacional , con particularización de una empresa cementera situada en la Comunidad Valenciana. 168. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/45659/PFC%20Alejandro.Ram%C3%B3n.pdf?sequence=-> - [21/2/22]
- MJ Bradley, & Associates. (2005). Mejor tecnología disponible para el control de la contaminación atmosférica en América del Norte: directrices para el análisis y estudios de caso. *Comisión Para La Cooperación Ambiental (CCA) de América Del Norte*, 1–65. Recuperado de: <http://www.cec.org/files/documents/publications/2195-best-available-technology-air-pollution-control-es.pdf> - [21-02-22]
- MVOTMA-SNA. (2019). Plan Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible. *Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente y Sistema Nacional Ambiental*, 89. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- OMS. (2000). *Guías para la calidad del aire 2000*. 54/239. <https://doi.org/OPS/CEPIS/PUB/04.110>
- OMS. (2005). *Air Quality Guidelines 2005*. Recuperado de: euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf - [21/2/22]
- OMS. (2021). *WHO "Global Air Quality Guidelines" Organization*. Recuperado de: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329> - [21/2/22]
- OPS. (1976). Red panamericana de muestreo de la contaminación del aire:(REDPAN-AIRE): Informe 1967-1974. OPS (Organización Panamericana de la Salud).
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). Proyecto de documento final de la cumbre de las Naciones Unidas para la aprobación de la agenda para el desarrollo después de 2015. *Africa*, 17852(10), 1–17. Recuperado de: https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf - [21-02-22]
- Radian International LLC. (1997). Manual del Programa de Inventarios de Emisiones de México - III Estimación de Emisiones. In *Desarrollo de inventarios de emisiones de fuentes de área*. <https://doi.org/DCN 97-670-017-05>
- Sanjuán, M. A., & Argiz, C. (2012). Nota técnica: La nueva norma Europea de especificaciones de cementos comunes UNE-EN 197-1:2011. *Materiales de Construcción*, 62(307), 425–430. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.07711>

- Segovia, S. S. (2018). *ECONOMÍA CIRCULAR Jornada UNE : Normalización en Economía Circular*. Recuperado de:
https://www.une.org/normalizacion_documentos/4%20OFICEMEN_EC.CIRCULAR%20JORNADA%20UNE.pdf - [21/2/22]
- Seoáñez, M. (2002). *Tratado de la contaminación atmosférica*. ISBN 84-8476-035-9
- SNRCC. (2017). *Política Nacional de Cambio Climático* (pp. 1–32). pp. 1–32. Recuperado de:
https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/Politica_CC_1.pdf - [21/2/22]
- UdelaR - DINAMA/ 2017. *Análisis de la evolución de la calidad del aire en Montevideo*. 2017.
- UdelaR, D. (2014). *Informe de avance Análisis de mediciones ambientales y meteorológicas en la ciudad de Montevideo. Agosto 2014*.
- Wark, Kenneth; Warner, C. (1999). *Contaminación del Aire. Origen y Control*. ISBN 968-18-1954-3
- World Health Organization. (2016). WHO's Urban Ambient Air Pollution database - Update 2016. *Who*, 1–7.
https://doi.org/entity/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/index.html