



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS

**“DISEÑO DE UN FILTRO DE AIRE PARA REDUCIR DIÓXIDO
DE CARBONO EMITIDO POR VEHÍCULOS AUTOMOTORES DE
GASOLINA”**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

AUTOR: MARAT DAVID SÁNCHEZ SALAO

DIRECTORA: Ing. RAFAELA VITERI UZCÁTEGUI. MSc.

Riobamba – Ecuador

2021

©2021, Marat David Sánchez Salao

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Marat David Sánchez Salao declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 30 de agosto de 2021



Marat David Sánchez Salao

060440384-0

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: el Trabajo de Integración Curricular: Tipo Proyecto técnico. “**DISEÑO DE UN FILTRO DE AIRE PARA REDUCIR DIÓXIDO DE CARBONO EMITIDO POR VEHÍCULOS AUTOMOTORES DE GASOLINA**”, realizado por el señor **MARAT DAVID SANCHEZ SALAO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

FIRMA

FECHA

Ing. Juan Carlos González García. PhD.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



Firmado electrónicamente por:
**JUAN CARLOS
GONZALEZ
GARCIA**

30 de agosto de 2021

Ing. María Rafaela Viteri Uzcátegui. MSc
**DIRECTORA DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR**



Firmado electrónicamente por:
**MARIA RAFAELA
VITERI
UZCATEGUI**

30 de agosto de 2021

Ing. Juan Carlos Castelo Valdivieso. MSc
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Firmado electrónicamente por:
**JUAN CARLOS
CASTELO
VALDIVIESO**

30 de agosto de 2021

DEDICATORIA

A mi amada esposa y mi hijo que siempre han estado conmigo, a mis padres, por brindarme siempre todo su apoyo y cariño, a mi hermano que de alguna u otra forma siempre me han animado a seguir adelante y ser mejor persona. A mi directora por todo su apoyo en el transcurso de esta etapa

Marat Sánchez

AGRADECIMIENTOS

A Dios a mi esposa, mi hijo y a mis padres quienes siempre me han apoyado y comprendido.

A mis amig@s quienes de alguna u otra forma me han ayudado y me han demostrado una amistad verdadera.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, que me permite ser una persona profesional. Mi más sincera gratitud a la Ing. Rafaela Viteri, Ing. Juan Carlos Castelo, Ing. Paul Montúfar, Lic. Mauro Tapia, quienes durante en el proceso del estudio de la investigación me han guiado en cada paso que he dado, han dedicado su tiempo y compartido su conocimiento siendo importante para la culminación de la tesis y sobre todo agradecerles de una manera muy especial por la confianza que me han brindado, por su paciencia, solidaridad, humildad y cariño.

Marat Sánchez

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
INDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xi
ABREVIATURAS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	15

CAPÍTULO I

1.	MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	17
1.1.	Antecedentes de la investigación.....	17
1.2.	Gases de Efecto Invernadero.....	18
1.1.1.	Actividades generadoras de GEI.....	19
1.1.2.	Dióxido de carbono como GEI.....	20
1.3.	Zeolitas.....	21
1.3.1.	Importancia de la relación Silicio/Aluminio.....	22
1.4.	Almacenamiento de CO ₂	22
1.5.	Captura de CO ₂ en materiales porosos.....	22
1.6.	Emisiones vehiculares.....	23
1.7.	Catalizadores.....	24

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO.....	26
2.1.	Tipo de Investigación.....	26
2.2.	Diseño del estudio.....	26
2.3.	Unidad de análisis.....	26
2.4.	Etapas de la investigación.....	27
2.4.1.	Obtención y caracterización del material base para el filtro.....	27
2.4.2.	Diseño y construcción del filtro.....	30
2.4.3.	Medición de emisiones.....	33

2.4.4.	Análisis estadístico	34
--------	----------------------------	----

CAPÍTULO III

3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
3.1.	Caracterización del material de adsorción	37
3.1.1.	Caracterización por medio del espectrómetro IR.	37
3.1.2.	Caracterización por medio de MEB.....	39
3.2.	Datos obtenidos con el analizador de gases MET.....	42
3.3.	Porcentaje de contaminantes adsorbido	46
3.4.	Análisis Estadístico	47

CONCLUSIONES.....	50
-------------------	----

RECOMENDACIONES	51
-----------------------	----

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Principales GEI según el IPCC - 2007	19
Tabla 1-2: Fuentes emisoras de GEI.	20
Tabla 1-3: Características generales de las zeolitas	21
Tabla 1-4: Contaminantes atmosféricos emitidos por los vehículos automotores	24
Tabla 2-1: Características del motor utilizado en el estudio	26
Tabla 2-2: Materiales, equipos y reactivos utilizados en el tratamiento de desaluminización. ...	27
Tabla 2-3: Pesos de las muestras tratadas con HCl	29
Tabla 2-4: Técnicas analíticas empleadas para la caracterización de zeolitas.	30
Tabla 2-5: Dimensiones del filtro.....	31
Tabla 2-6: Dimensiones del panel cerámico.....	33
Tabla 2-7: Pruebas estadísticas utilizadas.	35
Tabla 3-1: Frecuencias de vibración para las zeolitas vs muestras analizadas.....	38
Tabla 3-2: Relación Si/Al de zeolita Clinoptilolita tratadas con HCl: 0,3N y 0,5N.....	42
Tabla 3-3: Gases emitidos por un motor sin la presencia del filtro.....	43
Tabla 3-4: Gases emitidos por un motor con filtro	43
Tabla 3-5: Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor de gasolina. Marcha mínima o ralentí (prueba estática)	44
Tabla 3-6: Límites permisibles de emisión del método estático (Legislación Mexicana).....	44
Tabla 3-7: Comparación de las emisiones obtenidas en la parte experimental vs la legislación nacional e internacional vigentes	45
Tabla 3-8: Porcentaje de contaminantes adsorbido por el filtro.	46
Tabla 3-9: Resultados de la prueba de normalidad (Shapiro Wilk/ $n < 50$).....	47
Tabla 3-10: Resultados de la prueba de Kruskal Wallis (muestras independientes).	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Esquema del efecto invernadero.....	18
Figura 1-2: Emisiones de CO ₂ a nivel mundial y del país (Millones de toneladas).....	21
Figura 1-3: Tipos de emisiones vehiculares	23
Figura 1-4 : A) Reacciones de reducción en un convertor catalítico, B) Reacciones de oxidación en un convertor catalítico	25
Figura 2-1: Zeolita natural utilizada en la parte experimental.	27
Figura 2-2: Procedimiento para la desaluminización de zeolita natural.	28
Figura 2-3: Zeolita natural modificada con HCl 0,3N y 0,5N.	29
Figura 2-4: Tubo de escape del motor a combustión interna.....	31
Figura 2-5: Plano Vista General del filtro	31
Figura 2-6: Construcción del panel de acero para el filtro.	32
Figura 2-7: Plano Vista General del Panel	33
Figura 2-8: Filtro acoplado con el panel de acero para el motor a gasolina.....	33
Figura 2-9: Medición de emisiones.....	34
Figura 2-10: Proceso de pruebas estadísticas	35
Figura 3-1: Espectro IR de: A) zeolita Clinoptilolita modificada con HCl: 0,3 N.....	37
Figura 3-2: Espectro IR de Clinoptilolita modificada con HCl: 0,5N	38
Figura 3-3: Imágenes de MEB de la zeolita natural	39
Figura 3-4: Imágenes de MEB de la zeolita Clinoptilolita (HCl: 0,3N)	40
Figura 3-5: Imágenes de MEB de la zeolita Clinoptilolita (HCl: 0,5N).	40
Figura 3-6: Espectro de la composición química de A) zeolita natural, B) zeolita Clinoptilolita (HCl: 0,3N) y C) zeolita Clinoptilolita (HCl: 0,5N)	41

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3-1: Comparación de las concentraciones de salida de CO ₂ correspondientes a los tratamientos empleados.....	48
Gráfico 3-2: Comparación de las concentraciones de salida de CO correspondientes a los tratamientos empleados.....	48
Gráfico 3-3: Comparación de las concentraciones de salida de HC correspondientes a los tratamientos empleados.....	49

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: VISTA GENERAL DEL FILTRO

ANEXO B: VISTA TRIDIMENSIONAL DEL FILTRO

ANEXO C: VISTA GENERAL DEL PANEL CERÁMICO

ANEXO D: VISTA TRIDIMENSIONAL DEL PANEL CERÁMICO

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

CIC	Capacidad de intercambio catiónico
CII	Capacidad de intercambio iónico
COVs	Compuestos Orgánicos Volátiles
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
GEI	Gas de Efecto Invernadero
GLP	Gas licuado de petróleo
HEU	Heulanditas
IEA	Agencia Internacional de Energía
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y censos
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
MAAE	Ministerio de Ambiente y Agua de Ecuador
MEB	Microscopía electrónica de barrido
MP	Material Particulado
NOM	Normas Oficiales Mexicanas
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
OMS	Organización Mundial de la Salud
SERMANAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales – México
UPO	Universidad Pablo de Olavide

RESUMEN

El presente estudio plantea el diseño y construcción de un filtro para reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) de automotores a gasolina. Como parámetros para el diseño y la construcción del prototipo se consideraron las dimensiones del tubo de escape, así como los tratamientos probados que consistieron en variaciones en cuanto al material (zeolita natural o modificada) y masa de material adsorbente. Dado que el proceso de adsorción de contaminantes depende de la porosidad del material, se ha tratado por un lado la zeolita con ácido clorhídrico (HCl) y, por otro lado, caracterizado las muestras mediante espectrometría infrarrojo y microscopía electrónica de barrido. Posteriormente se estimó la concentración de los contaminantes mediante el analizador combinado de gases (Modelo: MET 6.3), para finalmente, analizar los resultados obtenidos mediante estadística descriptiva e inferencial, los mismos que fueron comparados con la legislación vigente. Como resultado final se reconoció que el mayor porcentaje de remoción de CO₂ se dio con la zeolita modificada 0,5 N con una masa de 50g; el rango de remoción fue entre 4,95 al 49,49% en función al material y la masa. Por lo que se concluyó que la desaluminización con ácido clorhídrico aumenta la porosidad del material, por ende, aumenta su potencial de adsorción (a mayor concentración del ácido, mayor captura de contaminantes). Se recomienda complementar este estudio a través de la implementación de pruebas dinámicas, de modo que se identifique si el potencial de adsorción de la zeolita es afectado por factores como el régimen de aceleración y el porcentaje de carga del motor.

Palabras clave: <INGENIERÍA AMBIENTAL>, <EMISIONES VEHICULARES>
<ADSORCIÓN> <CLINOPTILOLITA > <DESALUMINIZACIÓN>.



1831-DBRA-UTP-2021

ABSTRACT

The current study proposes the design and construction of a filter to reduce carbon dioxide (CO₂) emissions generated by gasoline-powered vehicles. The parameters considered for the design and construction of the prototype were: the dimensions of the exhaust pipe, as well as tested treatments consisting on the material variations (natural or modified zeolite) and mass of adsorbent material. Since the pollutant adsorption process depends on the material porosity, the treatment has been based on the use of zeolite with hydrochloric acid (HCl) and the samples have been characterized through infrared spectrometry and scanning electron microscopy. Then, the pollutant concentration was estimated with the use of the combined gas analyzer (Model: MET 6.3). Finally, the results obtained were analyzed through descriptive and inferential statistics and were compared with the current legislation. As a final result, it was evidenced that the highest percentage of CO₂ removal was obtained when using 0.5 N modified zeolite with a mass of 50g; the removal range was positioned from 4.95 to 49.49% depending on the material and mass. Therefore, it was concluded that dealumination with hydrochloric acid increases the porosity of the material, so that its adsorption potential increases (the higher the acid concentration, the greater the capture of pollutants). It is recommended to complement this study through the implementation of dynamic tests, to identify if the adsorption potential of the zeolite is affected by factors such as acceleration torque and the percentage of engine load.

Keywords: <ENVIRONMENTAL ENGINEERING>, <VEHICULAR EMISSIONS>
<ADSORPTION> <CLINOPTILOLITE> <DEALUMINATION>.

INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental por emisiones de CO₂ actualmente es un problema en el planeta y ponemos como dato el incremento en el año 2018, como consecuencia de las intensas actividades industriales de países como: China, Estados Unidos e India, según consta en el informe del Global Carbon Project, publicado en la revista *Nature*, el cual fue presentado en la Cumbre del Cambio Climático en Katowice, Polonia (Fresneda, 2018, párr. 1).

Las emisiones vehiculares (fuentes móviles) contribuyen de forma significativa a los inventarios nacionales y locales, ya que generan contaminantes como: dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (Llanes et al., 2018, párr. 1). Debido al impacto generado por las fuentes móviles en el aire ambiente, a nivel mundial se han establecido leyes y normas que regulan la contaminación vehicular, considerando parámetros como: el año de fabricación, el tipo de combustible, y las características del sistema de alimentación (Llanes et al., 2018, párr. 3).

En Ecuador para el año 2018 su parque automotor llegaba a más de 2'400.000 de vehículos, de los cuales, 218.000 tendrían más de 35 años, 60.000 entre 25 y 30 años, 160.000 entre 20 y 25 años y así va descendiendo el número de autos según los años (INEC, 2018, pp. 8). Se estima que el 35% de los autos que circulan en el país son altamente contaminantes debido a su antigüedad. En los últimos años, se ha producido un importante crecimiento del parque automotor en el país, lo cual ha contribuido al incremento de emisiones, deteriorándose así la calidad del aire, aspectos ligados a un sinnúmero de molestias y enfermedades asociadas a la contaminación.

Según un estudio y posteriores análisis efectuados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), pocas ciudades del Ecuador han sobrepasado los límites permisibles establecidos por organismos internacionales en lo que respecta a contaminación atmosférica. (Llanes et al., 2018, párr 4)

Para la depuración de los gases de escape en los motores a gasolina generalmente se utiliza un catalizador, cuyo efecto o acción produce agua y dióxido de carbono, siendo este último uno de los gases más importantes del efecto invernadero en el planeta. (Birgersson et al., 2004, pp. 435)

JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se encuentra en la sublínea de “tecnologías de tratamiento de recursos y residuos”; por lo que, es pertinente su desarrollo dado que se enmarca en el criterio de “sustentabilidad”. En el campo ambiental, el desarrollo de nuevos filtros y procesos basados en la utilización de los recursos naturales, con la finalidad de obtener una menor emisión de CO₂, es de vital importancia.

En la actualidad las nuevas tecnologías están colaborando decisivamente al desarrollo de materiales para la captura, almacenamiento o transformación del CO₂ generado durante la producción de energía por combustión de hidrocarburos. En estudios sobre la calidad de aire realizados por el Ministerio del Ambiente y Agua de Ecuador (MAAE) se determinó que el 40% de Hidrocarburos (HC) existentes en el aire del territorio nacional, provienen de los vehículos propulsados por gasolina.

A través de la síntesis y modificación de materiales sólidos cuyos poros o cavidades son similares al tamaño de las moléculas reactivas, es posible diseñar filtros capaces de reducir la cantidad de CO₂ emitida por los automóviles. Más aún, si el uso de estos filtros permite sustituir procesos menos eficientes, peligrosos o contaminantes para la reducción de CO₂.

La implementación de este filtro sería una opción aplicable al final de tubería (tubo de escape). Esto aporta numerosas ventajas ya que se trata de una solución emplazada al final del proceso combustión y salida de gases, lo que implica no tener que realizar grandes modificaciones en los componentes de los automotores. Por ello, el reto que se planteó en este proyecto, es obtener materiales altamente selectivos y de bajo coste, que presenten al mismo tiempo, una gran capacidad de captura de gases de efecto invernadero, tal es el caso del CO₂.

OBJETIVOS

General

- Diseñar un filtro para reducir el dióxido de carbono emitido por vehículos automotores a gasolina.

Específicos

- Ampliar el diámetro de poro del material zeolítico mediante procesos fisicoquímicos para una mejor adsorción de CO₂.
- Determinar el diseño del filtro para adaptarlo al tubo de escape de los automóviles a gasolina.
- Analizar la emisión de CO₂ en un motor de combustión interna con el filtro diseñado en este estudio y sin el mismo.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes de la investigación

En el siglo XX, los automóviles llegaron a ser un ícono en términos de invenciones y movilidad; el término automóvil significa “que se mueve por sí mismo”, por tanto refiere a los vehículos que se mueven o desplazan sobre un medio (Arroba y Jiménez, 2012, pp. 4). Los primeros motores a gasolina siguieron el esquema básico de los motores a vapor. Los automóviles generalmente emplean una fuerza proporcionada por un motor; en él se hace explotar una mezcla de aire y combustible (gasolina), utilizándose de esta manera dicha energía para el desplazamiento del automóvil (Arroba y Jiménez, 2012, pp 4; Fond, 2014, pp.52)

En la actualidad, la protección del ambiente es uno de los grandes retos a nivel mundial. En tal virtud, los fabricantes de automóviles tratan de construir sus productos de manera que se reduzca el impacto ambiental. En este sentido, la implementación del catalizador en los automotores fue un paso importante en el ámbito ecológico, dado que se redujo considerablemente el vertido de los gases contaminantes hacia la atmósfera (Arroba y Jiménez, 2012, pp. 7).

Desde 1750, la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera ha aumentado drásticamente como consecuencia de las actividades humanas. Esto es aproximadamente 280 ppm antes de la industrialización a 396 ppm en 2013. Por lo tanto, es esencial que se tomen acciones de mitigación para reducir sustancialmente las emisiones de GEI para el año 2050, cuyo valor se estima que sea alrededor del 40% al 70% de las emisiones en relación al año 2010; mientras que para el 2100 se prevee una reducción del 100% de emisiones con relación al mismo año 2010 (Pedraza et al., 2018, párr 2). Esta meta también fue adoptada en París durante la conferencia de las partes COP-21 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Vegara et al., 2013, pp. 16).

Hace algunos años, investigaciones referentes al cambio climático dieron la voz de alarma sobre el papel del dióxido de carbono (CO₂) como uno de los principales agentes implicados en el denominado efecto invernadero. De esta forma, un gas en principio no contaminante y esencial para el desarrollo de la vida (las plantas lo necesitan para crecer – interviene en la fotosíntesis), se ha convertido en una amenaza para los ecosistemas al incrementarse su concentración en la atmósfera.

En la Universidad Pablo de Olavide (UPO), un grupo de investigadores dirigido por Sofía Calero ha puesto en marcha una iniciativa destinada a captar y aprovechar los GEI procedentes del sector industrial. El proyecto, calificado de excelencia en 2007 por la Consejería de Innovación, Ciencia

y Empresa fue financiado con un monto de 297.668 euros y apostó por el diseño de nuevos materiales que sirvan a modo de filtros moleculares capaces de atrapar los contaminantes. En 2012, Ecoviate fabricó un filtro que utilizaba el proceso de fotosíntesis y reacciones químicas simples para reducir el dióxido de carbono de la fuente. Específicamente, empleaba una mezcla de algas e hidróxido de sodio para filtrar el dióxido de carbono emitido por los tubos de escape de los vehículos. Se puede colocar en cualquier tubo de escape y su uso puede darse en cualquier momento. El propósito de este proyecto fue adaptar el equipo a cualquier tubo de escape para que cualquier usuario pueda reducir más fácilmente las emisiones de dióxido de carbono de los automotores, fábricas y plantas de carbón. (Jorques, 2013, párr. 4)

1.2. Gases de Efecto Invernadero

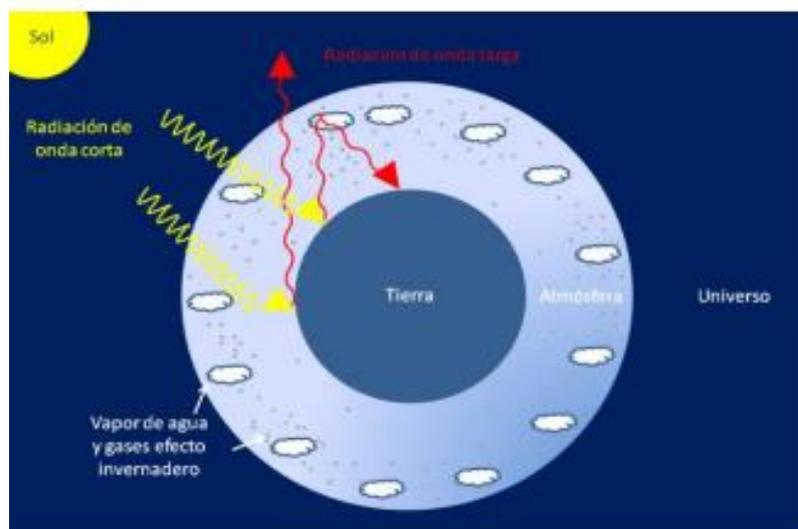


Figura 1-1: Esquema del efecto invernadero

Fuente: Ruíz, 2016, pp. 9.

Según varios informes del IPCC, existe nueva evidencia de que el efecto invernadero es causado principalmente por GEI procedentes de las actividades antropogénicas. La tierra recibe la energía solar a través de la radiación infrarroja, que consiste en ondas de corta longitud del sol y ondas largas emitidas por elementos de diferente estado de agregación del sistema atmosférico terrestre. El efecto invernadero es provocado por la retención de calor en la atmósfera debido a la absorción y re-radiación de las nubes y ciertos gases. En cuanto a la radiación de onda larga, una fracción abandona la atmósfera y la otra se refleja a la tierra como consecuencia de los GEI. Estos gases se encuentran en pequeñas cantidades en la atmósfera y reflejan radiación térmica de onda larga en todas direcciones. Esto hace que la radiación regrese a la tierra y sea reflejada nuevamente por ésta. (Ruíz, 2016, pp. 8)

Entre los gases de efecto invernadero (GEI) destacan: el metano (CH₄), el dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), ozono troposférico (O₃) y los cloro-fluorocarbonos (Benavides y León, 2007, pp. 26; Racines, 2018, pp. 11).

El 97% de los GEI presentes en la atmósfera han sido generados por el hombre, desde 1750 su concentración se ha incrementado gradualmente; tal es el caso del CO₂, cuya concentración se ha incrementado en un 40% hasta la década de los 90. A partir de esa década, la emisión de este GEI se aceleró, obteniéndose en el 2016 una concentración de 403.3 ppm, valor más alto registrado en los últimos 150 años. (Racines, 2018, pp. 11)

La siguiente tabla indica los principales GEI considerados por el IPCC, los cuales paralelamente son contemplados en el protocolo de Kioto: Dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, perfluorocarbonos (PFCs) y Hexafluoruro de azufre (SF₆).

Tabla 1-1: Principales GEI según el IPCC - 2007

Gas de Efecto Invernadero	Concentración mundial en 2013 (ppm)	Potencial de calentamiento Global (PCG)
Dióxido de Carbono	396	1
Metano	1,84	21
Óxido nitroso	0,32	310
Tetrafluorometano	0,95	6,500
Hexafluoretano	0,0153	9,200
Hexafluoruro de azufre	0,0078	23,900

Fuente: Ruíz, 2016, pp. 9.

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

1.1.1. Actividades generadoras de GEI

Los volcanes constituyen una de las fuentes naturales de GEI, se ha identificado que durante la fase activa de un volcán se emiten dióxido de carbono; no obstante, si se compara con la totalidad de emisiones antropogénicas, se libera una cantidad menor (Michon, 2016, párr. 1; Ruíz, 2016, pp.10). Los volcanes emiten un promedio de 13 a 230 millones de toneladas de dióxido de carbono cada año, mientras que, debido a la quema de combustibles fósiles, anualmente se liberan a la atmósfera alrededor de 26 millones de toneladas de CO₂. Desde la Revolución Industrial (siglo XVIII), la producción de bienes y servicios aumentó significativamente, aspectos que conllevaron a una mayor demanda y consumo de combustibles fósiles. En este sentido, las actividades humanas (como la quema de combustibles fósiles y la deforestación de los bosques) generan cada vez más emisiones de GEI. (Ruíz, 2016, pp. 10)

Las emisiones de GEI, como CO₂, CH₄, N₂O y gases fluorados proceden de diversas fuentes antropogénicas y naturales.

Tabla 1-2: Fuentes emisoras de GEI.

GEI	Fuentes
CO ₂	Quema de combustibles fósiles, residuos sólidos, árboles y productos de madera. La deforestación y la degradación de los suelos
CH ₄	Durante la producción y el transporte de carbón, gas natural y petróleo. También resultan de la ganadería, las prácticas agrícolas y de la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos en los vertederos de residuos sólidos urbanos
N ₂ O	Durante las actividades agrícolas e industriales y la combustión de combustibles fósiles y residuos sólidos
Gases fluorados	Procesos industriales y de los usos comerciales y domésticos, no ocurren naturalmente. A veces se utiliza como sustituto de sustancias que agotan el ozono, como los clorofluorocarbonos.

Fuente: Ruíz, 2016, pp. 10

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

1.1.2. Dióxido de carbono como GEI

En función a las emisiones totales a la atmósfera, el dióxido de carbono es el gas de efecto invernadero más importante. Su vida media en la atmósfera oscila entre 50 y 200 años, y su potencial de calentamiento se designa como 1 y generalmente se utiliza como referencia para determinar el potencial de otros GEI. Su contribución al efecto invernadero es aproximadamente el 76 % con relación al total de GEI en el mundo. (Ruíz, 2016, pp. 14)

La EPA señaló que la emisión global de CO₂ es representativo de la emisión neta de GEI, dado que constituye el 82% de las emisiones totales derivadas del consumo y/o quema de combustibles fósiles (Ruíz, 2016, pp. 14). Para el caso de Ecuador las emisiones equivalen a un mínimo porcentaje en relación al total mundial. Es así que en el 2016, los valores fueron 35,02 Ton y 33.432,04 Ton respectivamente (Arroyo y Miguel, 2019, pp. 1-2). Entre el 2017 y 2018 se estimó un crecimiento de las emisiones globales de CO₂ de 1,7%, siendo los países de mayor contribución: China (28,6%), Estados Unidos (14,75%) e India (6,94%) (Fundación AQUAE, 2018, párr. 3). La tendencia general sugiere que las emisiones de CO₂ se han incrementado en los centros poblados debido al crecimiento del parque automotor (Rojas et al., 2018, pp. 24).

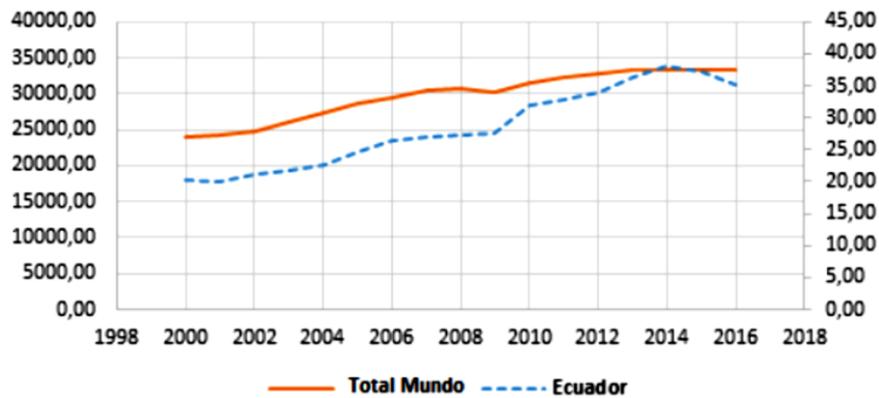


Figura 1-2: Emisiones de CO₂ a nivel mundial y del país (Millones de toneladas)
Fuente: Arroyo y Miguel, 2019, pp. 2.

1.3. Zeolitas

Las zeolitas constituyen una familia de rocas formadas principalmente por aluminosilicatos (aluminio, silicio y oxígeno). Debido a su estructura cristalina, poseen una porosidad uniforme. (EPA, 1999, pp. 2). Las propiedades fundamentales de las zeolitas son: intercambio iónico, adsorción y actividad catalítica (Espinoza, Olmos y Hernández, 2016, párr 5). Su capacidad de adsorción depende tanto del volumen poroso como el diámetro de poro, y es por este motivo que se los denomina “tamices moleculares”. La capacidad de intercambio iónico (CII) es alta en zeolitas ricas en aluminio. Y generalmente intervienen como catalizadores de varios procesos, ya que poseen una mayor actividad y selectividad (Ximénez, 2004, pp. 3-4).

Tabla 1-3: Características generales de las zeolitas

CARACTERÍSTICA	RANGO O VALOR
Diámetro de poro	2 a 12 angstroms
Diámetro de cavidades	6 a 12 angstroms.
Superficie interna	Varios cientos de m ² /g
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	0 a 650 meq/100g
Capacidad de adsorción	<0,35 cm ³ /g
Estabilidad térmica	Desde 200° hasta más de 1.000°C

Fuente: Costafreda, 2011.

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

Las zeolitas naturales han sido utilizadas en el tratamiento de aguas residuales (remoción de amonio y metales pesados) y el aire; su eficiencia en estos procesos está ligada a la pureza. Dentro de este tipo de zeolitas destaca el grupo de las heulanditas (HEU) por su abundancia, y dentro de este grupo, la clinoptilolita es considerada como la zeolita natural más abundante. (Ruíz, 2016, pp. 25)

Las zeolitas sintéticas son obtenidas a partir de soluciones acuosas saturadas (Morante et al., 2005, pp. 2). A diferencia de las zeolitas naturales, no presentan limitantes en la remoción de

contaminantes, es así que tienen un mayor número de aplicaciones, por ejemplo: refinación de petróleo, tratamiento de efluentes, mejoradores del suelo, entre otras (Ruíz, 2016, pp. 25-26).

1.3.1. Importancia de la relación Silicio/Aluminio

La relación silicio/aluminio está ligada directamente con el contenido catiónico de la zeolita (Ruíz, 2016, pp. 25). La capacidad de intercambio iónico (CII) es “una magnitud que da una medida del monto de equivalentes de un catión que es capaz de retener por intercambio iónico una masa de zeolita”, capacidad relacionada con el contenido de aluminio de la red zeolítica (Curi et al., 2006, párr. 14). Una elevada capacidad de intercambio iónico refiere una baja relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Curi et al., 2006, párr 14; Ximénez, 2004, pp.18).

Existen diversos tratamientos para la modificación de zeolitas, tal es el caso de la desaluminización, el cual suprime los átomos de aluminio a fin de mejorar o potenciar las propiedades térmicas, estabilidad e hidrofobicidad, aspectos que incrementan notablemente la selectividad de las zeolitas (Arévalo y Azuero, 2019, pp.11). El proceso de desaluminización de zeolitas se realiza a través de vapor a alta temperatura o por contacto con disoluciones ácidas (Fangyuan, 2014, pp. 3). Investigaciones sugieren que tratamientos con ácidos como el HCl permiten aumentar el volumen de poro de zeolitas (Ruíz, 2016, pp. 44-45).

1.4. Almacenamiento de CO₂

La captura y almacenamiento de CO₂ constituye una de las técnicas implementadas para reducir las emisiones en centrales eléctricas e industrias. Según un estudio de la Agencia Internacional de Energía (IEA), la captura y almacenamiento de dióxido de carbono es una medida de mitigación que puede reducir la concentración de dióxido de carbono a 350 ppm para el 2050. La EPA menciona que para reducir la concentración de CO₂ es recomendable almacenar este gas después de la captura. Ambos procesos implican el transporte de dióxido de carbono (generalmente a través de tuberías) a las profundidades del océano. Por tanto, será absorbido por árboles, césped, suelo y algas; o se convertirá en carbonato mineral de tipo roca u otros productos. El último paso (almacenamiento) toma lugar en una formación rocosa subterránea de un kilómetro o más de profundidad, que es impermeable y evita que la formación rocosa subterránea migre al suelo y a la atmósfera. (Ruíz, 2016, pp. 23 -24)

1.5. Captura de CO₂ en materiales porosos

La adsorción es un fenómeno o proceso en el que los átomos o moléculas de una sustancia que se encuentran en fase líquida o gaseosa se retienen en la superficie de otra sustancia que generalmente es sólida, como resultado de fuerzas de interacción físicas o químicas (Ruíz, 2016, pp.

23). El término “adsorbente” refiere al sólido, “adsortivo” es el gas o líquido sin adsorber, y “adsorbato” es el gas o líquido adsorbido en la superficie (Martín, 2004, pp. 7).

En la adsorción química, la interacción es similar al enlace químico entre la molécula adsorbida y la superficie; puede restringirse a puntos moleculares definidos en la superficie, así como a bajas temperaturas (25 ° C). Mientras que, en la adsorción física, la interacción principal es del tipo van der Waals, en la que las moléculas adsorbidas se unen débilmente a la superficie a bajas temperaturas. (Ruíz, 2016, pp. 23)

Para la adsorción de CO₂, se emplean materiales sintéticos o naturales, tales como: óxidos metálicos (óxido de magnesio), hidrotalcita, carbón activado y zeolita con alta área superficial. En la naturaleza, existen varios materiales de tipo adsorbente que capturan y almacenan el CO₂ incluso a temperatura ambiente, tal es el caso de ciertas arcillas y zeolitas. (Ruíz 2016, pp. 24)

1.6. Emisiones vehiculares

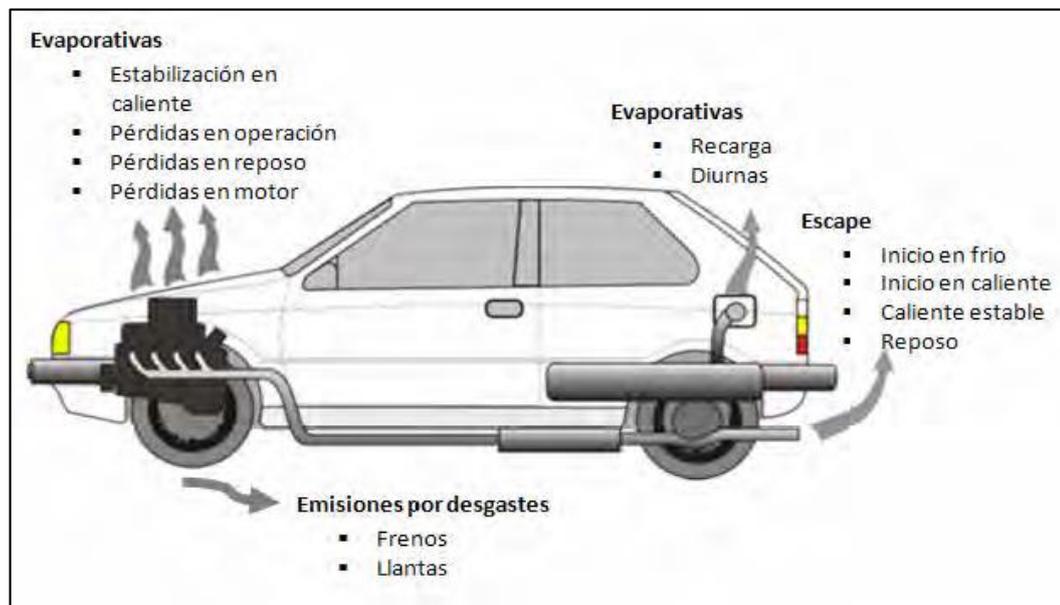


Figura 1-3: Tipos de emisiones vehiculares

Fuente: Lara et al., 2009, pp. 5.

Los vehículos automotores producen tres tipos de emisiones, siendo éstas: 1) evaporativas, 2) de escape y 3) partículas generadas por el desgaste de componentes como los frenos y las llantas (Instituto Mexicano de Transporte, 2010, pp. 26). El primer grupo de emisiones proceden de la evaporación de combustibles, por tanto se emiten cuando los vehículos están en reposo o movimiento; su magnitud depende de factores como: características del automotor, aspectos climáticos y meteorológicos. Dentro de las emisiones evaporativas se incluye: emisiones diurnas, emisiones del vehículo recién apagado y con el motor caliente, emisiones de operación, emisiones en reposo, emisiones durante la recarga de combustible (Instituto Mexicano de Transporte, 2010, pp. 26 - 27; Lara et al., 2009, pp. 4-5).

Las emisiones del escape son el resultado de la combustión de gasolina, diésel, GLP o biocombustibles. Los productos de la quema de combustibles comprenden contaminantes como CO₂, CO, HC, óxidos de nitrógeno y material particulado. Este tipo de emisiones depende generalmente de las características del automotor (tecnologías para el control de emisiones, estado o mantenimiento), aspectos operativos (velocidad, aceleración, etc.) y la calidad del combustible (Instituto Mexicano de Transporte, 2010, pp. 27). La cantidad de material particulado (PM_{2.5}) generado del proceso de combustión es superior al procedente del desgaste de neumáticos y frenos, razón por la cual, esta última es omitida de los inventarios de emisiones (Lara et al., 2009, pp. 8).

Los principales contaminantes atmosféricos emitidos por los automotores son:

Tabla 1-4: Contaminantes atmosféricos emitidos por los vehículos automotores

CONTAMINANTE	DESCRIPCIÓN
Hidrocarburos	Compuestos orgánicos que se presentan cuando la combustión no se lleva a cabo o se da de forma incompleta. Son precursores del ozono troposférico.
Dióxido de carbono	Este gas no causa daños significativos en la salud humana, pero contribuye notoriamente al calentamiento global.
Monóxido de carbono	Gas inodoro e incoloro, capaz de combinarse con la hemoglobina, causando una reducción del flujo de oxígeno en el torrente sanguíneo (efecto tóxico en la salud – alteraciones en el sistema nervioso y cardiovascular).
Metano	Gas producido durante la quema de combustibles. Debido a que su potencial de calentamiento es 21 veces superior al CO ₂ , contribuye de forma significativa en el calentamiento global.
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	Incluye al NO y al NO ₂ . Provocan la acidificación de la lluvia, la formación de ozono troposférico, y son capaces de irritar las vías respiratorias.
Dióxido de azufre	A nivel ambiental, reaccionan con la humedad ambiental generando la lluvia ácida. Además causa irritación en las vías respiratorias. Es necesario mencionar que este gas puede reducir la eficiencia de los catalizadores presentes en los automotores.
Compuestos orgánicos volátiles (COV _s)	Incluye una variedad de compuestos generados por combustión incompleta. Al igual que los HC causan daños en la salud y son precursores del ozono a nivel troposférico.
Material particulado (PM)	Partículas cuyo diámetro aproximado es de 1,3μ, contienen hollín, HC condensados y azufre. Están asociados a un sinnúmero de enfermedades respiratorias: reducción de la función pulmonar, asma, y muertes prematuras por deficiencias a nivel respiratorio y cardiovascular.

Fuente: Lara et al., 2009, pp. 7-9; Riveros, Cabrera y Martínez, 2009, pp. 4-5; Instituto Mexicano de Transporte, 2010, pp. 28-30.
Realizado por: Sánchez, M., 2021.

1.7. Catalizadores

Los catalizadores son sustancias químicas que se han incluido en los automotores con la finalidad de modificar la composición de los gases de escape antes de ser liberados en la atmósfera (reducción de CO, HC y NO_x de la mezcla gaseosa de escape) (Condori, 2015, párr 2).

Los conversores catalíticos postcombustión contienen una solución de metales preciosos que se usa con diferentes aleaciones, y otros elementos como: platino (Pt), paladio (Pd), rodio (Rh), etc (Rojas, Romero y Pancha, 2019, pp. 24 -25). Los conversores catalíticos pueden realizar procesos químicos de reducción u oxidación:

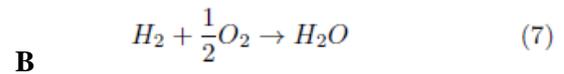
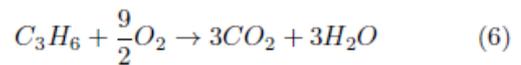
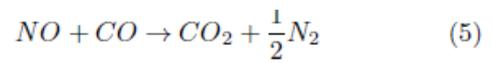
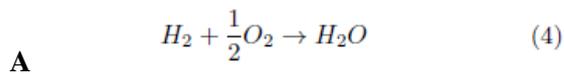
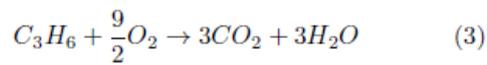
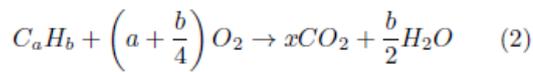
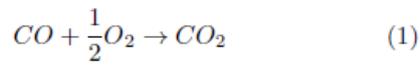


Figura 1-4 : A) Reacciones de reducción en un conversor catalítico, B) Reacciones de oxidación en un conversor catalítico

Fuente: Rojas, Romero y Pancha, 2019, pp. 25.

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Tipo de Investigación

La investigación es de tipo experimental, ya que se aplican diferentes tratamientos a fin de determinar los cambios que se producen, y se comparan las concentraciones de los contaminantes emitidos por los grupos experimentales con el grupo de control o testigo.

2.2. Diseño del estudio

El diseño de investigación es de tipo experimental, dado que involucra las fases de medición, recopilación y análisis de datos relacionados a las emisiones de CO₂ y otros gases contaminantes, variables que dependen de la aplicación del filtro, para finalmente en el análisis de datos del presente estudio llegar a conclusiones estadísticas en torno a los tratamientos (estadística descriptiva e inferencial).

2.3. Unidad de análisis

El experimento se realizó en el Laboratorio de Análisis Instrumental en la Facultad de Ciencias, laboratorio de Materiales y Motores en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – ciudad de Riobamba, y en un centro de servicios profesionales de mantenimiento automotriz “Taller Ecoautos” ubicado en la ciudad de Riobamba con la utilización del analizador de gases MET 6.3 perteneciente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica Automotriz

La unidad de análisis del presente estudio fue un motor cuyas características se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2-1: Características del motor utilizado en el estudio.

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Cilindraje	150 cc
Número de cilindros	1
Relación de compresión	9,5:1
Diámetro x carrera	57,3 x 57,8 mm
Potencia	19,8 hp a 8500 RPM
Par motor	1,35 kgf.m a 7500 RPM
Válvulas	4

Sistema de encendido	Chispa
Motor-Combustible	Gasolina
Transmisión	Manual
Tanque de combustible	12 L

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

2.4. Etapas de la investigación

El presente trabajo de titulación de tipo técnico involucró las siguientes etapas:

2.4.1. Obtención y caracterización del material base para el filtro

2.4.1.1. Obtención de zeolita natural Clinoptilolita

La zeolita natural clinoptilolita fue adquirida por vía comercial a la empresa “WATPRO S.A” ubicada en la ciudad de Quito, provincia de Pichincha. La cantidad adquirida fue de 1 kg.



Figura 2-1: Zeolita natural utilizada en la parte experimental.

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

2.4.1.2. Tratamiento de Desaluminización de Zeolita

Los materiales, equipos y reactivos utilizados para la modificación de la zeolita clinoptilolita a través de un proceso de desaluminización fueron:

Tabla 2-2: Materiales, equipos y reactivos utilizados en el tratamiento de desaluminización.

Materiales	Reactivos	Equipos
<ul style="list-style-type: none"> • Zeolita natural Clinoptilolita • 2 Crisoles • Pipeta de 250 mL 	<ul style="list-style-type: none"> • Ácido Clorhídrico 0,5N • Ácido Clorhídrico 0,3N • Agua destilada 	<ul style="list-style-type: none"> • Mufla • Secador

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

La siguiente figura contiene el procedimiento aplicado para la desaluminización de la zeolita natural:

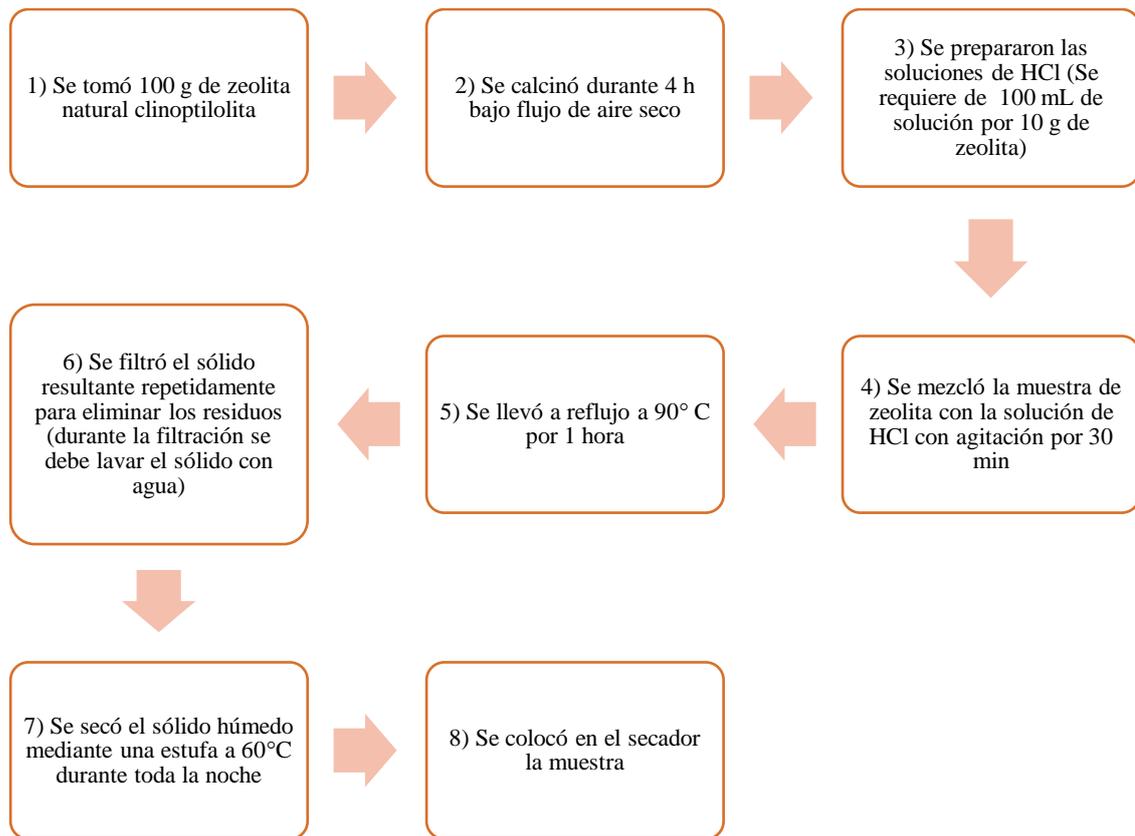


Figura 2-2: Procedimiento para la desaluminización de zeolita natural

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

Los cálculos para la preparación de las soluciones de HCl son:

Datos:
 Concentración 36,46% m/m
 Densidad: 1,12 g/mL = 1120 g/L

$$1L \text{ sln} \times \frac{1120 \text{ g sln}}{1 \text{ L sln}} \times \frac{36 \text{ g soluto}}{100 \text{ g sln}} = 408,352 \text{ g HCl}$$

$$N = \frac{\text{equivalentes}}{L \text{ sln}}$$

$$N = \frac{408,352 \text{ eq g}}{36,5 \text{ g}} = 11,18 \text{ N}$$

$$\text{eq} = V \text{ sln} \times \text{Normalidad}$$

$$1 \text{ L sln} \times \frac{0,3 \text{ eq}}{1 \text{ L sln}} = 0,3 \text{ eq HCl}$$

Para 0,3N de HCl

$$0,3 \text{ eq HCl} \times \frac{1 \text{ L sln}}{11,18 \text{ eq HCl}} = 0,02683 \text{ L} = \mathbf{26,83 \text{ mL de HCl (sln)}}$$

Para 0,5N de HCl

$$0,5 \text{ eq HCl} \times \frac{1 \text{ L sln}}{11,18 \text{ eq HCl}} = 0,04472 \text{ L} = \mathbf{44,72 \text{ mL de HCl (sln)}}$$

Las masas obtenidas después de la desaluminización con HCl son:

Tabla 2-3: Pesos de las muestras tratadas con HCl

Peso inicial (g)	Concentración HCl (N)	Peso final (g)
100,0046	0,3	98,0016
100,0227	0,5	98,0012

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

2.4.1.3. Caracterización de Zeolita Natural desaluminizada

Las muestras de zeolita desaluminizada fueron analizadas en el laboratorio de Química Analítica de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, mediante la técnica de espectroscopia de infrarrojo, así como, en el laboratorio de Materiales y Motores de la Facultad de Mecánica, por medio de la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB).



Figura 2-3: Zeolita natural modificada con HCl 0,3N y 0,5N.

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

A continuación, se presenta una tabla, la cual muestra las técnicas analíticas empleadas para la caracterización de los materiales zeolíticos modificados:

Tabla 2-4: Técnicas analíticas empleadas para la caracterización de zeolitas.

TÉCNICA	INFORMACIÓN DE SALIDA	PROCEDIMIENTO
Espectroscopía de infrarrojo	Grupos funcionales (Análisis cualitativo)	<ul style="list-style-type: none">• Se pulveriza las piedras de zeolita.• Se coloca una porción de la muestra de zeolita pulverizada en el espectrómetro IR.• Se obtiene la gráfica del espectro IR de la muestra.• Se elimina el “ruido” que aparece en el espectro IR a manera de interferencia.• Se interpreta el espectro IR, asignando las bandas más representativas a los grupos funcionales correspondientes.
Microscopía electrónica de barrido	Microestructura (morfología y tamaño)	<ul style="list-style-type: none">• Esta técnica se realiza a través de un microscopio electrónico de barrido (Marca: JEOL); para ello se entrega las muestras pertinentes al técnico encargado del laboratorio de Materiales de la facultad de Mecánica, quien remite los resultados pertinentes.

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

2.4.2. *Diseño y construcción del filtro.*

Tanto para el diseño como para la construcción del filtro se consideraron los siguientes aspectos: resistencia a altas temperaturas y sellado total. El diseño del filtro tiene la característica de ser acoplado sin problema al tubo de escape del vehículo; en consecuencia, describiendo el prototipo mencionamos que es circular con una entrada y salida de los gases (en los extremos), y su diámetro ajustado en función de las medidas del tubo de escape – (*Ver anexos A y B*).

2.4.2.1. *Elaboración del filtro*

Luego de la elaboración de varios bocetos se procedió con la definición de los planos del filtro de gases para su construcción; el mismo que fue construido con tubo de acero inoxidable como materia prima. La construcción del filtro tuvo lugar en el taller Industrial “*Tubos de escape Guadalupe*” en la ciudad de Riobamba.

Para su diseño, previamente se midió el diámetro del tubo de escape del motor de prueba.



Figura 2-4: Tubo de escape del motor a combustión interna
Realizado por: Sánchez, M., 2021.

En base a los planos realizados que se muestran en la figura 2-5, se procedió a la construcción del filtro de gases.

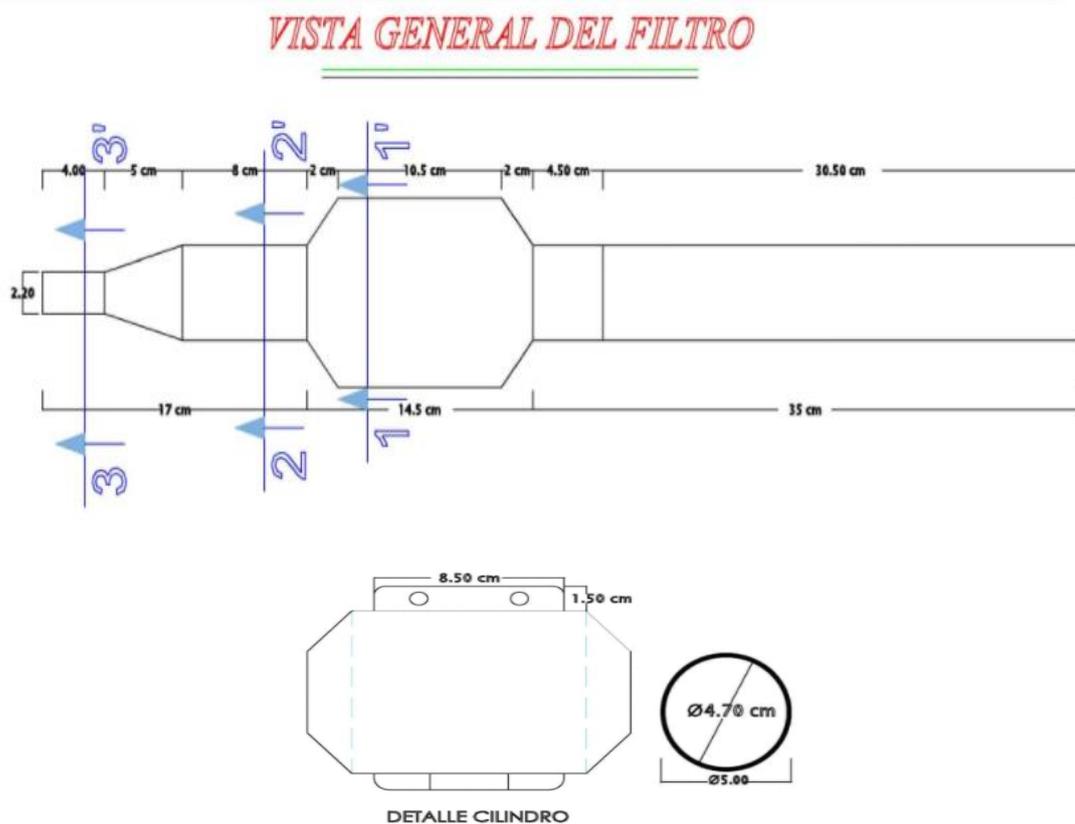


Figura 2-5: Plano Vista General del filtro
Realizado por: Sánchez, M., 2021.

Las dimensiones con la que se construyó el filtro son:

Tabla 2-5: Dimensiones del filtro

Sección	Unidad (cm)
Diámetro interno de entrada de gases	2,20

Diámetro externo de entrada de gases	2,50
Diámetro interno de base para el panel de acero	10,00
Profundidad de base para el panel de acero	14,50
Diámetro interno de salida de gases	4,70
Diámetro externo de salida de gases	5,00
Largo Total del filtro	66,5

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

2.4.2.2. Elaboración del panel de acero

Dentro del filtro se acopla un panel de acero con la finalidad de colocar en él las muestras de zeolita natural y modificada. La construcción de este panel cerámico a base de acero reforzado tuvo lugar en el taller industrial “El éxito” de la ciudad de Riobamba, siendo su forma similar al de un panel de abejas (con cavidades para colocar las muestras) (Ver anexos C y D). Se construyó un total de 9 paneles de acero.



Figura 2-6: Construcción del panel de acero para el filtro.

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

En base a los planos realizados (figura 11), se procedió a la construcción del panel de acero.

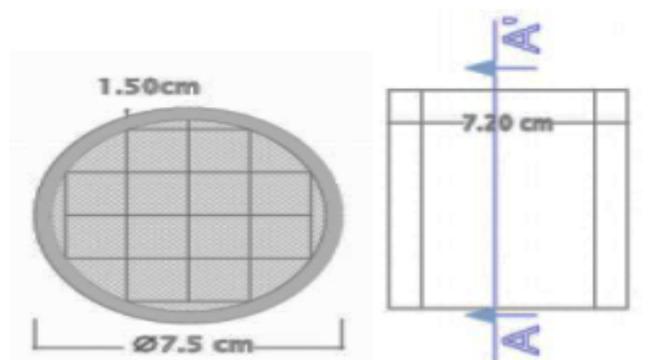


Figura 2-7: Plano Vista General del Panel

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

Las dimensiones del panel de acero son:

Tabla 2-6: Dimensiones del panel cerámico.

Sección	Unidad cm
Diametro externo del panel de acero	7,50
Profundidad del panel de acero	7,20
Medida de las cámaras cuadrículadas	1,50
Diámetro de Orificios de Malla externa	0,26

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

2.4.2.3. Implementación de Zeolita en el panel y filtro

Una vez ensamblado el filtro, el panel de acero, y después de haber realizado las pruebas suficientes de acoplamiento al tubo de escape del automóvil, se colocó la zeolita (natural o modificada) en el interior del panel de acero del filtro.



Figura 2-8: Filtro acoplado con el panel de acero para el motor a gasolina.

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

2.4.3. Medición de emisiones.

Para esta medición se utilizó el analizador de gases MET 6.3 del laboratorio de Ingeniería Automotriz de la ESPOCH. Este dispositivo es compacto, de poco peso y permite analizar de manera precisa contaminantes gaseosos como hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) con cálculo del valor Lambda (Maquituve S.L. 2019). Las mediciones

tuvieron lugar en el taller “*ECOAUTOS*”, ubicado en la Av. Canónigo Ramos junto a la ESPOCH (ciudad de Riobamba).

Los análisis en cuanto a contaminantes atmosféricos, se realizó por triplicado para cada tratamiento (3 materiales y 3 espesores diferentes = 9 tratamientos en total), obteniendo así 27 mediciones para cada contaminante (HC, CO y CO₂).



Figura 2-9: Medición de emisiones.

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

2.4.4. *Análisis estadístico*

En lo referente a este apartado, se trabajó el análisis tanto con estadística descriptiva como con estadística inferencial.

Por un lado, se aplicó estadística descriptiva con la finalidad de determinar la media de cada tratamiento. Este estadístico se lo estima para calcular el porcentaje de remoción de contaminantes:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{[\text{Contaminante}] \text{ CON FILTRO} - [\text{Contaminante}] \text{ SIN FILTRO}}{[\text{Contaminante}] \text{ SIN FILTRO}} \times 100\%$$

Donde:

[Contaminante]: Concentración el contaminante – media de cada tratamiento.

De otra parte, con el fin de determinar el mejor tratamiento posible se aplicó estadística inferencial. Pues al respecto los autores Flores, Miranda y Villasís, (2017) señalan que “*el análisis inferencial solamente debe ser usado en los estudios donde se trata de comparar los resultados entre 2 o más grupos, o bien, se quiere establecer los cambios en un mismo grupo*”.

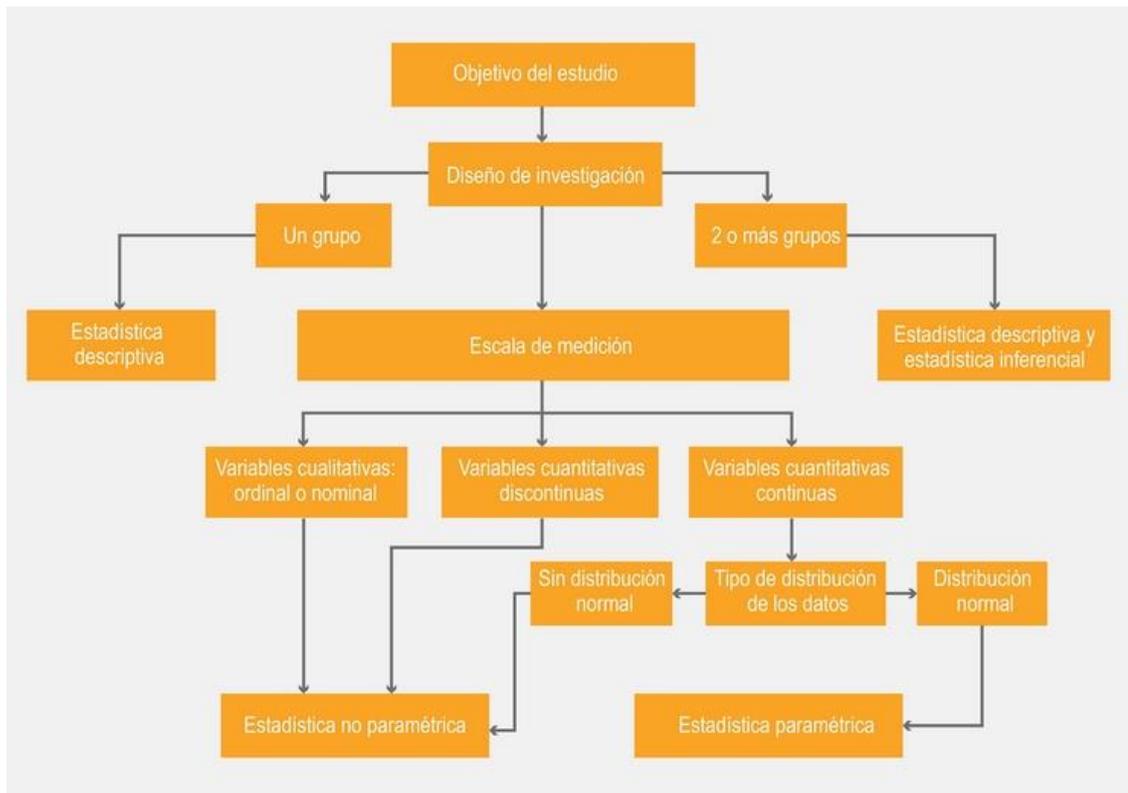


Figura 2-10: Proceso de pruebas estadísticas

Fuente: Flores, Miranda y Villasís, 2017, pp. 366.

En cuanto a la escala de medición se identifica que la variable dependiente del presente estudio es la concentración del contaminante (CO₂, CO y HC), la cual es de tipo cuantitativa continua. Para determinar el tipo de distribución de los datos y realizar las pruebas estadísticas elaboramos una base de datos en el software IBM SPSS Statistics 24. A continuación se presenta la Tabla 11, misma que refiere las pruebas estadísticas utilizadas.

Tabla 2-7: Pruebas estadísticas utilizadas.

PASO	ASPECTO A DETERMINARSE	PRUEBA	OBSERVACIÓN
1	Tipo de Distribución	Shapiro- Wilks	<ul style="list-style-type: none"> Esta prueba se aplica cuando el tamaño máximo de la muestra es de 50 ($n \leq 50$). El resultado de esta prueba es que las DISTRIBUCIONES SON NO NORMALES, por lo tanto se utilizó estadística NO PARAMÉTRICA.
2	Comparar 3 o más grupos.	Kruskall – Wallis	<ul style="list-style-type: none"> Empleamos esta prueba ya que contábamos con 9 grupos de comparación para cada contaminante (3 tipos de material –, zeolita natural, modificada 0,3 N y 0,5 N, y 3 pesos - 15, 30 y 50 g). El software utilizado en el análisis descarta los grupos que no se ajustan a la distribución no paramétrica.

3	Identificar el mejor tratamiento	Diagrama de caja y bigotes	<ul style="list-style-type: none">• Permite comparar las medianas de los tratamientos.
---	----------------------------------	----------------------------	--

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

En base a la significancia (p-value) obtenida en la prueba de Kruskal Wallis se acepta o se rechaza la hipótesis nula (H_0 : Los tratamientos son iguales).

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización del material de adsorción.

3.1.1. Caracterización por medio del espectrómetro IR

En la Figura 3-1 se presentan los espectros IR de las muestras de zeolita modificada mediante desaluminización.

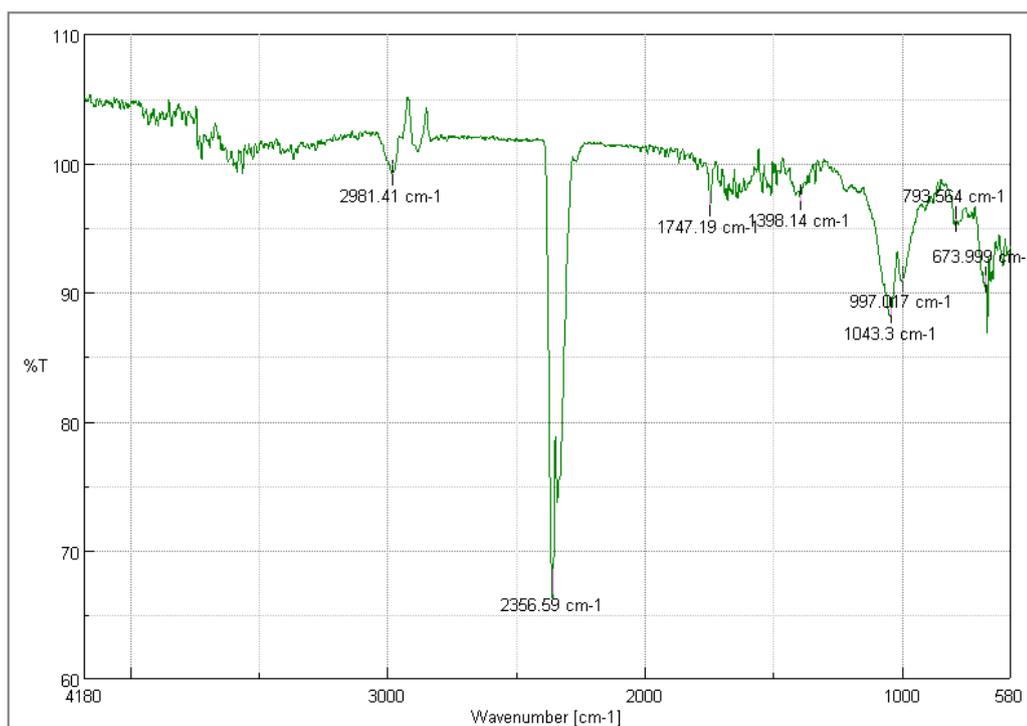


Figura 3-1: Espectro IR de: A) zeolita Clinoptilolita modificada con HCl: 0,3 N

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

El espectro IR de la zeolita clinoptilolita modificada con HCl: 0,3N indica una vibración de intensidad fuerte en los $2356,59\text{ cm}^{-1}$, seguida por vibraciones de intensidad media en los $1043,3$; $997,017$ y $673,999\text{ cm}^{-1}$

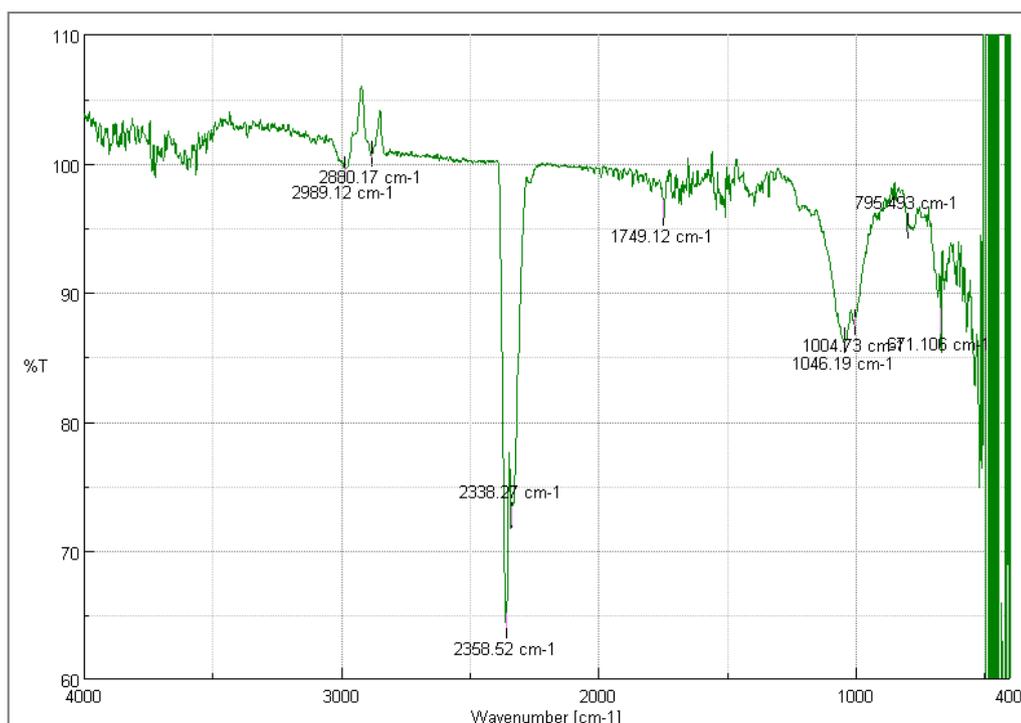


Figura 3-2: Espectro IR de Clinoptilolita modificada con HCl: 0,5N

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

El espectro IR de la zeolita clinoptilolita modificada con HCl: 0,5N refiere vibraciones de intensidad fuerte en las longitudes de onda: 2358,52 y 2338, 27 cm^{-1} ; y vibraciones de intensidad media en los 1046,19; 1004,73 y 671,106 cm^{-1} .

Los espectros IR de las dos muestras analizadas (Zeolita clinoptilolita 0,3 y 0,5 N) son similares. En ambos casos se tiene una vibración de intensidad fuerte entre los 2000 y 2500 cm^{-1} , y vibraciones de intensidad media sobre y bajo los 1000 cm^{-1} .

Tabla 3-1: Frecuencias de vibración para las zeolitas vs muestras analizadas.

GRUPO DE FRECUENCIAS	ASIGNACIÓN*	FRECUENCIA DE VIBRACIÓN (cm^{-1})*	ZEOLITA (HCl: 0,3N)	ZEOLITA (HCl: 0,5N)
Interna: De los tetraedros TO ₄	Tensión Asimétrica “Stretching”	1250 - 950	1043,3	1046,19
	Tensión Simétrica “Stretching”	720 - 650	673,999	671,106
	Deformación T -O “Bending”	500 - 420	-	-
Externa: De los enlaces entre tetraedros	Doble anillo	650 - 500	-	-
	Abertura de poro	420 - 300		
	Tensión Asimétrica “Stretching”	1150 - 1050	-	-

	Tensión Simétrica “Stretching”	750 -820	793,564	795,493
--	-----------------------------------	----------	---------	---------

Fuente:* Asignación y frecuencia de vibración extraídos de García, 2002, pp. 40; Morante, 2004, pp 141-144.

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

Conforme a los espectros IR se identifica que las muestras de Clinoptilolita (0,3 y 0,5 N) tienen las siguientes frecuencias vibracionales típicas de las zeolitas: Internas propias de los tetraedros TO_4 (tensión asimétrica y simétrica) y externa (tensión simétrica). Morante (2004, pp. 141 -144), analizó mediante espectroscopía infrarroja diferentes muestras de zeolita provenientes de yacimientos de Ecuador, y obtuvo las siguientes frecuencias vibracionales: enlaces externos (tensión simétrica y asimétrica, y apertura de poro) e interna (tensión asimétrica, deformación T-O, tensión OH y deformación H_2O). Las caracterizaciones realizadas por Zambrano (2019, pp. 62), refieren frecuencias vibracionales en enlaces externos (tensión asimétrica y doble anillo) e internos (tensión simétrica y asimétrica); además presenta un pico vinculado a la absorción del agua ($1679,69\text{ cm}^{-1}$) y una banda O-H ($3638,05\text{ cm}^{-1}$). Por su parte, García (2002, pp. 40-42), determinó que las bandas o longitudes de onda comunes para todas las muestras de zeolita se ubican entre: a) $950\text{ a }1250\text{ cm}^{-1}$ de la tensión asimétrica externa y b) $420\text{ a }500\text{ cm}^{-1}$ de la deformación T-O.

3.1.2. Caracterización por medio de MEB

A continuación se muestran las imágenes captadas por el Microscopio Electrónico de Barrido:

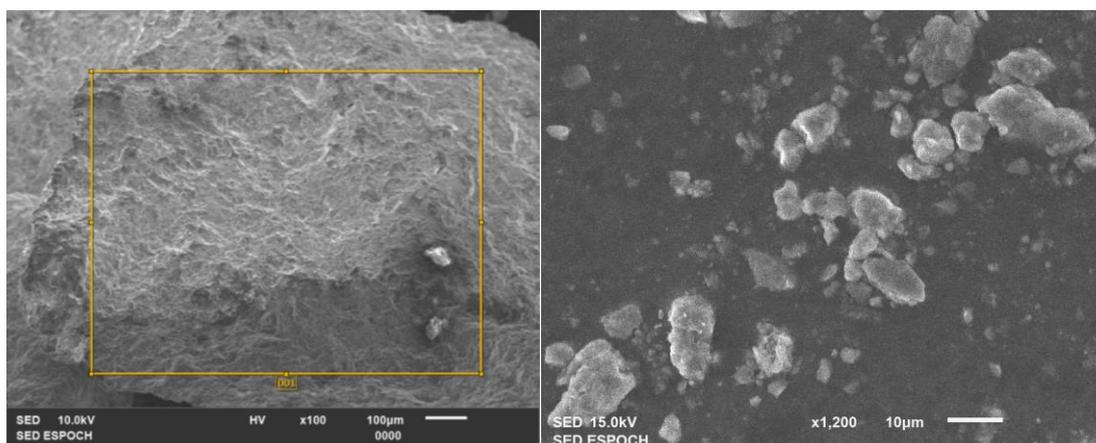


Figura 3-3: Imágenes de MEB de la zeolita natural

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

La zeolita natural presenta una superficie rugosa (Figura 3-3 izquierda) y su morfología es irregular, ya que varía desde formas ovoides a otras de contorno no definido (Figura 3-3 Derecha-mayor resolución).

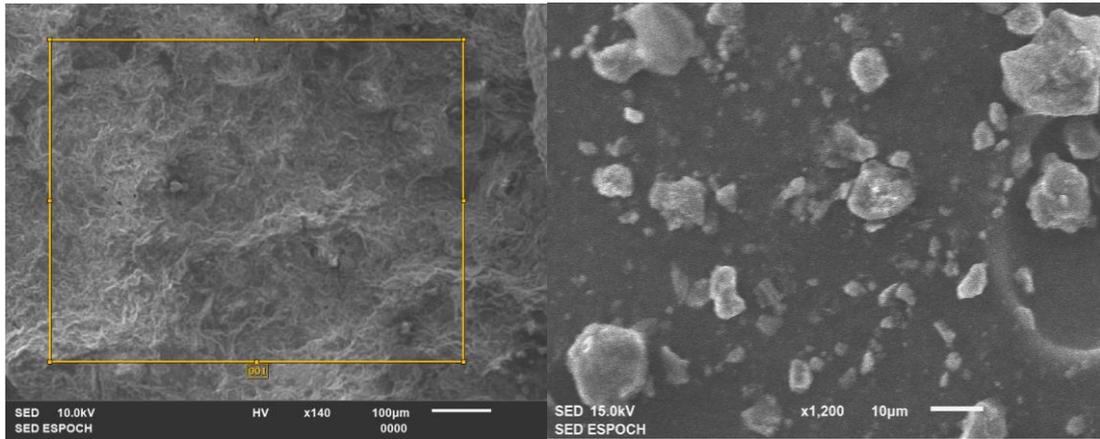


Figura 3-4: Imágenes de MEB de la zeolita Clinoptilolita (HCl: 0,3N)

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

La zeolita modificada con HCl 0,3 N tiene una superficie de mayor porosidad que la zeolita natural (Figura 3-4 izquierda). Su morfología es variable, pudiéndose encontrar formas relativamente circulares, ovoides y otras no definidas.

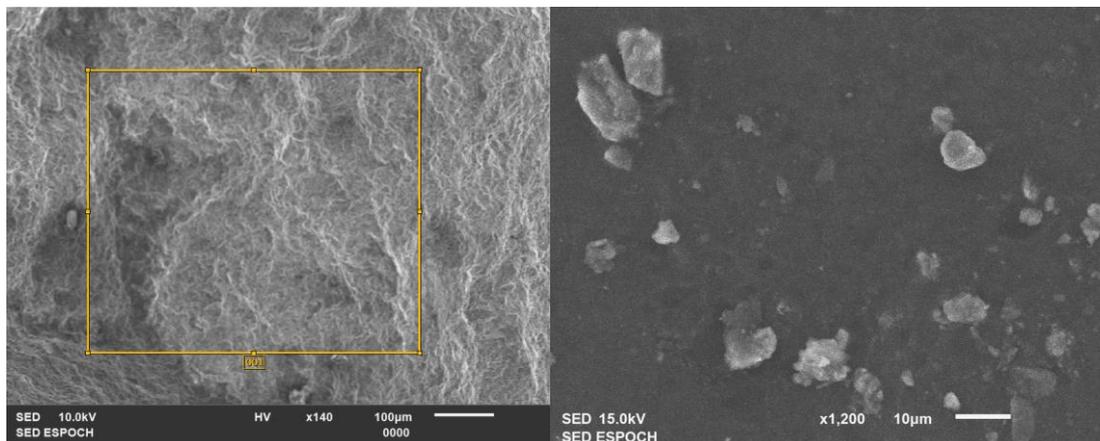


Figura 3-5: Imágenes de MEB de la zeolita Clinoptilolita (HCl: 0,5N).

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

La zeolita modificada con HCl 0,5 N posee una superficie irregular, su porosidad es similar a la de la zeolita modificada con HCl 0,3 N. Sus partículas presentan formas variables, siendo éstas: circulares, ovoides y no definidas.

Las micrografías obtenidas por el autor Ruíz (2016, pp. 58), muestran que las partículas de las zeolitas sintetizadas a partir de clinoptilolita son en su mayoría esféricas. En contraste, Morante (2004, pp. 149), señala que los cristales típicos de la zeolita Clinoptilolita son tabulares (o en forma de paralelepípedo) y presentan además partículas amorfas que pueden corresponder a cuarzos y feldespatos.

Al contrastar las imágenes de mayor resolución, se aprecia que en la muestra que se trató con HCl 0,5 N existe una mayor cantidad de espacio vacío, en consecuencia, se deduce que el tamaño de poro es mayor.

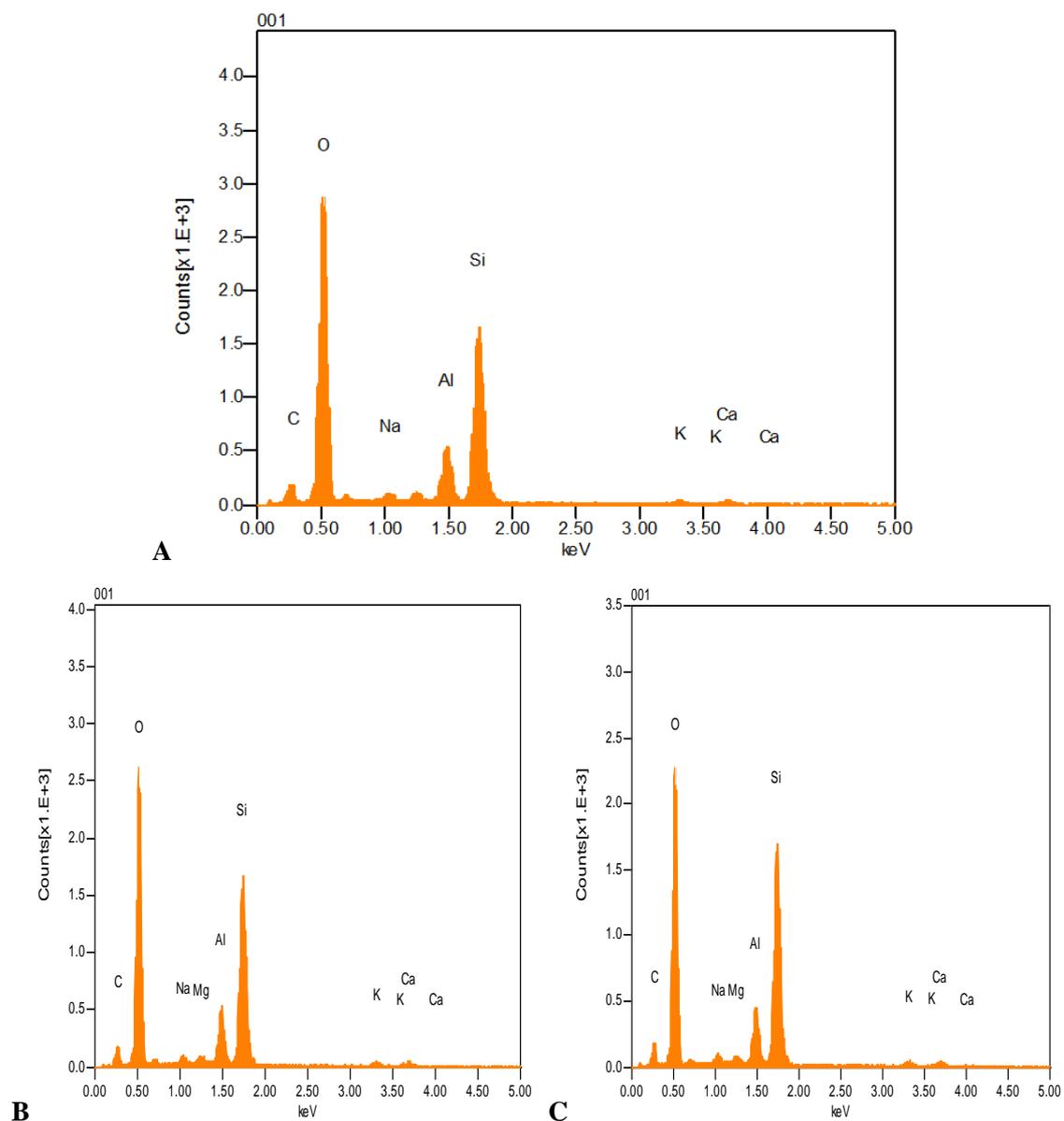


Figura 3-6: Espectro de la composición química de A) zeolita natural, B) zeolita Clinoptilolita (HCl: 0,3N) y C) zeolita Clinoptilolita (HCl: 0,5N)

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

La figura 3-6 (A, B y C) refiere la composición química elemental de las muestras empleadas en el filtro. Las muestras tratadas con HCl (Espectros B y C) presentan una composición química común, siendo los elementos representativos en orden descendente: O, Si, Al, C, Na, Mg, K y Ca. Por su parte, la zeolita clinoptilolita natural posee la mayor parte de elementos presentes en las muestras tratadas con HCl, a excepción del magnesio. En las muestras de zeolita modificada, el

Mg se encuentra en el siguiente porcentaje (% masa): 0,66% para la zeolita 0,3N y 0,64% para la zeolita 0,5N.

Montes *et al.* (2015, pp. 10), modificaron zeolita natural Clinoptilolita con CaCl_2 , y determinaron que los principales elementos de ambas muestras (natural y modificada) son: O, Na, Mg, Ca, Al, Si y K. La principal diferencia entre dichas muestras fue en el porcentaje de Ca y Na, siendo el porcentaje de Ca mayor para la muestra modificada, y el porcentaje de Na menor.

Tabla 3-2: Relación Si/Al de zeolita Clinoptilolita tratadas con HCl: 0,3N y 0,5N

Muestra	SiO ₂ (%mol)	Al ₂ O ₃ (%mol)	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
Zeolita Clinoptilolita (HCl: 0,3N)	49,58	6,72	7,378
Zeolita Clinoptilolita (HCl: 0,5N)	48,10	5,48	8,777

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

Las muestras de zeolita clinoptilolita modificadas registran una relación SiO₂/Al₂O₃ relativamente mayor a la reportada en otras investigaciones, la zeolita modificada con 0,3 N de 7,378 y la muestra tratada con HCl 0,5 N de 8,777. Los resultados de Quispe *et al.* (2019, párr. 19.), refieren un valor de 4,31 para muestras de clinoptilolita natural extraídas en el territorio boliviano. Las zeolitas del grupo de las heulanditas tienen una relación de Si/Al que oscila entre 4 a 5,5 (López *et al.*, 2010, párr. 3; Espinoza, Paniagua y Torres, 2020, pp. 596). Sin embargo, es conveniente considerar que las zeolitas naturales generalmente tienen impurezas como: cuarzos y albita, por tanto no todo el silicio y aluminio corresponden a la clinoptilolita (Ruíz, 2016, pp. 88).

Por su parte, Céspedes *et al.* (2011, pp. 86), menciona que el aumento de la concentración de ácidos utilizados en el tratamiento o modificación de zeolitas aumenta la relación molar SiO₂/Al₂O₃; todo esto como resultado de la eliminación de aluminio. Aspecto corroborado en la presente investigación conforme a los resultados obtenidos y que se expresan en la tabla 13.

3.2. Datos obtenidos con el analizador de gases MET.

Se comprobó el correcto funcionamiento del motor así como de todos los sistemas de enfriamiento, combustible y eléctricas para evitar fallas durante las pruebas.

Una vez encendido el motor se esperó 15 minutos para que las temperaturas de trabajo y las mediciones fueran más exactas, siendo las condiciones más importantes de operación del motor las siguientes:

- Presión: 72KP
- Temperatura del motor: 90°C
- Temperatura ambiente: 10°C

A través del analizador de gases MET se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3-3: Gases emitidos por un motor sin la presencia del filtro

CONTAMINANTE	CONCENTRACIÓN	R1	R2	R3	MEDIA
CO ₂	%	12,7	12,7	12,8	12,73
CO	%	4,6	4,5	4,5	4,53
HC	ppm	400	400	399	399,67

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

La Tabla 3-3 titulada “*gases emitidos por un motor sin la presencia de un filtro*” presenta la concentración media de CO₂, CO y HC, siendo 12,73%, 4,53% y 199,67 ppm respectivamente. Además se identifica que los valores obtenidos para las diferentes réplicas de los contaminantes analizados no varían significativamente. Rocha *et al.*, (2018) analizó los gases del motor de un vehículo Nissan sentra 1.6 L. 4P. GLS, siendo el combustible utilizado gasolina extra; las emisiones en ralentí fueron: 5,33% de CO₂, 2,69% de CO y 244,33 ppm correspondiente a HC.

Tabla 3-4: Gases emitidos por un motor con filtro

COMPONENTE	MASA	CO ₂ (%)	CO (%)	HC (ppm)	MEDIA CO ₂ (%)	MEDIA CO (%)	MEDIA HC (ppm)
Zeolita natural	15	12,10	4,60	390,00	12,10	4,60	390,00
		12,20	4,60	390,00			
		12,00	4,60	390,00			
	30	12,10	4,20	388,00	12,10	4,33	388,33
		12,10	4,20	388,00			
		12,10	4,60	389,00			
	50	11,60	4,10	387,00	11,63	4,10	386,67
		11,70	4,10	387,00			
		11,60	4,10	386,00			
Zeolita modificada 0,3 N	15	8,20	3,90	389,00	8,13	3,87	389,00
		8,10	3,90	389,00			
		8,10	3,82	389,00			
	30	7,50	3,80	390,00	7,50	3,80	390,00
		7,50	3,80	390,00			
		7,50	3,80	390,00			
	50	7,30	3,55	387,00	7,30	3,56	387,00
		7,30	3,55	387,00			
		7,30	3,58	387,00			
Zeolita modificada 0,5 N	15	6,90	3,55	379,00	6,90	3,56	379,67
		6,90	3,55	380,00			
		6,90	3,57	380,00			

	30	6,50	3,42	380,00	6,50	3,41	381,00
		6,50	3,40	381,00			
		6,50	3,42	382,00			
	50	6,40	3,40	375,00	6,43	3,41	375,33
		6,50	3,42	375,00			
		6,40	3,41	376,00			

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

La Tabla 3-4 muestra las concentraciones de los *contaminantes atmosféricos una vez instalado el filtro y colocado el material de prueba*. Las concentraciones menores se obtuvieron con la zeolita modificada con HCl 0,5 N (Medias para el CO₂: 6,43 - 6,90 %; CO: 3,41 – 3,56% y HC: 375,33 – 381 ppm), seguido por la zeolita modificada 0,3 N y la zeolita natural. En base a los resultados de las Tablas 12 y 13 se identifica que la presencia del filtro disminuye la concentración de los contaminantes emitidos (resultados numéricos relativamente altos en las pruebas realizadas sin el filtro).

La NTE INEN 2204 (Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2017) establece los límites permisibles de los contaminantes emitidos por vehículos automotores a gasolina. Para el caso de la marcha mínima o ralentí, las emisiones no deben superar los siguientes valores:

Tabla 3-5: Límites máximos de emisiones permitidos para fuentes móviles con motor de gasolina. Marcha mínima o ralentí (prueba estática)

Año modelo	%CO		ppm HC	
	0-1500b	1500-3000b	0-1500b	1500-3000b
2000 y posteriores	1,0	1,0	200	200
1990 a 1999	3,5	4,5	650	750
1989 y anteriores	5,5	6,5	1000	1200

Fuente: Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2017, pp 3.

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

Nota: b sugiere altitud (msnm)

La normativa a nivel nacional no establece un valor criterio para el CO₂ es así que se considerará la NOM-041-SEMARNAT-2014:

Tabla 3-6: Límites permisibles de emisión del método estático (Legislación Mexicana)

Año – modelo vehicular	HC (ppm)	CO (% V)	O ₂ (% V)	CO + CO ₂ (% V)	
				Min	Max
1993 y anteriores	400	3,0	2,0	13	16,5
1994 y posteriores	100	1,0	2,0	13	16,5

Fuente: Sánchez et al., 2019, pp. 31.

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

Para establecer una comparación se considerará el año de fabricación del motor Quingqi 150 cc (2006) y las condiciones de prueba corresponden a las ambientales a nivel de la ciudad de Riobamba: Presión atmosférica 0,704 atm, densidad del aire 0,84 kg/m³, temperatura media 22,7°C y altitud 2754 msnm (Salvador, 2018, pp. 7).

Tabla 3-7: Comparación de las emisiones obtenidas en la parte experimental vs la legislación nacional e internacional vigentes

COMPONENTE	MASA	% CO ₂	% CO	HC ppm	%CO +%CO ₂
Ninguno	-	12,73	4,53	399,67	17,26
Zeolita Natural	15	12,1	4,6	390	16,7
	30	12,1	4,33	388,33	16,43
	50	11,63	4,1	386,67	15,73
Zeolita modificada 0,3 N	15	8,13	3,87	389	12
	30	7,5	3,8	390	11,3
	50	7,3	3,56	387	10,86
Zeolita modificada 0,5 N	15	6,9	3,56	379,67	10,46
	30	6,5	3,41	381	9,91
	50	6,43	3,41	375,33	9,84
INEN 2204		-	1	200	-
NOM-041-SEMARNAT-2014		-	1	100	13-16,5

Fuente: Sánchez et al., 2019, pp. 31.

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

Las emisiones de CO (%) e hidrocarburos (ppm) de todos los tratamientos no cumplen con los límites permisibles de la INEN 2204 y de la NOM 041 SERMANAT- 2014. Con relación al parámetro %CO + %CO₂ se establece un rango de 13% a 16,5% en la normativa mexicana, los tratamientos que exceden dichos valores son el control (sin filtro) -17,26% -y la zeolita natural (masa 15g) – 16,7%; en contraste, los componentes que generan emisiones bajo ese rango corresponden a las muestras de clinoptilolita modificada (todas las masas: 15, 30 y 50 g).

Cuando un motor funciona correctamente, el CO₂ alcanza un valor entre el 12% al 15%, siendo este rango un buen indicador de la eficiencia del proceso de combustión, ya que lecturas bajas indican que el proceso de combustión presenta deficiencias (mezclas inadecuadas o encendido defectuoso) (Augeri, 2011, párr. 10). Dado que en la prueba realizada sin el filtro se obtuvo un valor de 12,73% de CO₂ y el valor lambda¹ en las pruebas osciló entre 1,017 y 1,02, se asume que los valores bajos en la presente investigación registrados para los tratamientos con zeolita modificada, se deben a la implementación de materiales adsorbentes.

¹ Cuando Lambda es igual a 1 se interpreta que el aire y el combustible han sido mezclados en la proporción estequiométrica, si el valor es mayor a 1 indica que la relación aire-combustible es pobre (Augeri, 2011, párr. 31).

3.3. Porcentaje de contaminantes adsorbido

Tabla 3-8: Porcentaje de contaminantes adsorbido por el filtro.

COMPONENTE	MASA (g)	REMOCIÓN CO ₂ (%)	REMOCIÓN CO (%)	REMOCIÓN HC (%)
Zeolita natural	15	4,95	-1,55*	2,42
	30	4,95	4,42	2,84
	50	8,64	9,49	3,34
Zeolita modificada 0,3 N	15	36,14	14,57	2,67
	30	41,08	16,11	2,42
	50	42,66	21,41	3,17
Zeolita modificada 0,5 N	15	45,80	21,41	5,00
	30	48,94	24,72	4,67
	50	49,49	24,72	6,09

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

Nota:* Para el filtro de zeolita natural de 15 g se obtiene un valor negativo en el porcentaje de remoción, dado que la concentración media de este contaminante fue mayor al del motor sin filtro. Este aspecto puede deberse a errores aleatorios, tal es el caso de variaciones en el proceso de combustión del motor a causa de factores ambientales.

En la Tabla 3-8 titulada “*porcentaje de contaminantes adsorbido por el filtro.*”, las celdas marcadas con color amarillo refieren los porcentajes de mayor remoción para cada contaminante (CO₂, CO y HC), mientras que las celdas de color rojo representan el menor porcentaje removido. Para todos los contaminantes analizados, la mayor remoción se registró con la zeolita modificada 0,5 N (masa: 50 g); en contraposición, el menor porcentaje correspondió a la zeolita natural (15 g). Con este menor porcentaje de remoción de la zeolita natural coinciden: a) la zeolita natural (30g) que produjo una menor reducción de CO₂, y b) la zeolita modificada 0,3 N (30g) que de igual forma removió poca cantidad de HC. Para el caso del CO, la mayor adsorción se da con 30 y 50 g de zeolita modificada 0,5N.

Adicionalmente se observa que, para todos los tratamientos la mayor eficiencia de remoción se da para el CO₂ (entre 4,95 al 49,49%), seguido por el CO (0 – 24,72%) y el HC (2,42% al 6,09%). Los ácidos generan cambios en la estructura de las zeolitas, tales como: pérdida de la cristalinidad, aumento de la acidez, e incremento de las dimensiones de sus canales y poros (Céspedes et al., 2011, pp. 86-87). La adsorción de CO₂ de las muestras tratadas con HCl se ve favorecida, dado que el ácido mejora el área superficial de la clinoptilolita, permitiendo capturar mayor cantidad del contaminante (Espinoza, Paniagua y Torres, 2020, pp. 598).

La clinoptilolita natural tiene una gran cantidad de iones Ca²⁺ y la adsorción de CO₂ es “medianamente favorable”, por el contrario las zeolitas intercambiadas con Na⁺ - (forma

homoiónica tratada con NaCl) presentan los valores más altos de adsorción, seguida por la clinoptilolita desaluminizada – (Tratada con HCl) (Hernández et al., 2010, pp. 71).

3.4. Análisis Estadístico

Tabla 3-9: Resultados de la prueba de normalidad (Shapiro Wilk/ $n < 50$).

Comp. \ Masa	15	30	50	CONTAMINANTE
Zeolita Natural	1,00	_*	0,000	CO ₂
Zeolita modificada 0,3 N	0,000	_*	_*	
Zeolita modificada 0,5 N	_*	_*	0,000	
Zeolita Natural	_*	0,000	_*	CO
Zeolita modificada 0,3 N	0,000	_*	0,000	
Zeolita modificada 0,5 N	0,000	0,000	1,00	
Zeolita Natural	_*	0,000	0,000	CH
Zeolita modificada 0,3 N	_*	_*	_*	
Zeolita modificada 0,5 N	0,000	1,00	0,000	

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

Nota: * Para los tratamientos señalados no se estima el valor de la significancia dado que no existe variabilidad en las mediciones.

Hipótesis:
 $H_0 =$ La distribución es normal
 $H_a =$ La distribución es no normal

En función a los valores de la significancia para grupo de datos (Tabla 3-9) se identifica que la mayor parte de datos siguen una distribución no normal (Para un nivel de confianza del 95%: Si la significancia $< 0,05$ entonces rechazo H_0). Por tanto, se aplicó estadística no paramétrica para comparar los diferentes tratamientos.

Tabla 3-10: Resultados de la prueba de Kruskal Wallis (muestras independientes).

HIPÓTESIS NULA	SIGNIFICANCIA	DECISIÓN
La distribución de la concentración de CO ₂ es la misma entre las categorías de grupo*.	1,000	Rechazar la hipótesis nula
La distribución de la concentración de CO es la misma entre las categorías de grupo*.	1,000	Rechazar la hipótesis nula
La distribución de la concentración de HC es la misma entre las categorías de grupo*.	1,000	Rechazar la hipótesis nula

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

Nota:* Cada grupo está constituido por: tipo de material y la masa.

Hipótesis:

H_0 = Los tratamientos no difieren en la concentración final de contaminantes
 H_a = Los tratamientos difieren en la concentración final de contaminantes.

Conforme al nivel crítico (o significancia) obtenido en la prueba estadística de Kruskal Wallis, se rechaza H_0 . Por tanto, se concluye que los tratamientos difieren en la concentración final de los contaminantes (CO_2 , CO y HC). A continuación, se identificará cual es el mejor tratamiento en función de diagramas de caja y bigote.

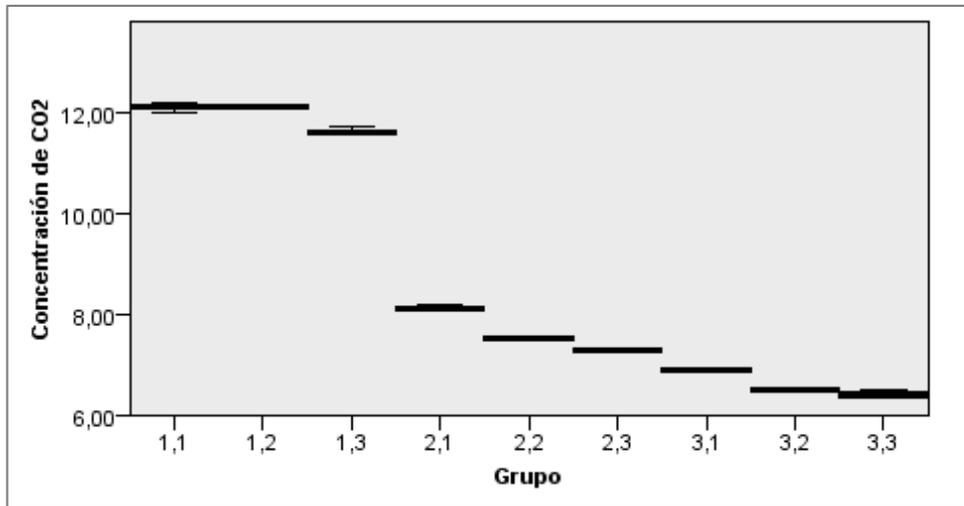


Gráfico 3-1: Comparación de las concentraciones de salida de CO_2 correspondientes a los tratamientos empleados.

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

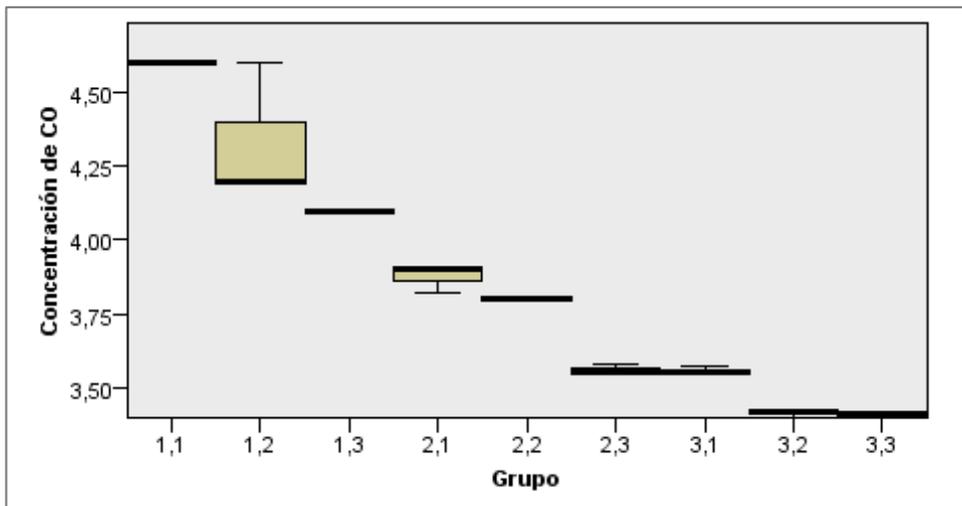


Gráfico 3-2: Comparación de las concentraciones de salida de CO correspondientes a los tratamientos empleados.

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

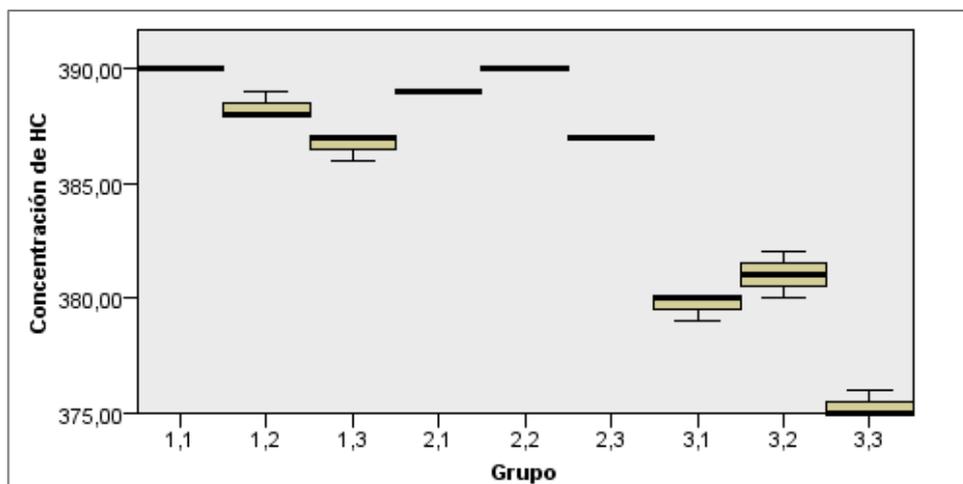


Gráfico 3-3: Comparación de las concentraciones de salida de HC correspondientes a los tratamientos empleados.

Realizado por: Sánchez, M., 2021.

Nota para los gráficos 1, 2 y 3:* Para la denominación de cada grupo se utilizó el código: número, número. El primer dígito refiere el tipo de material (zeolita natural – 1, zeolita modificada 0,3 N – 2 y zeolita modificada 0,5 N - 3), y el segundo dígito refiere la masa (15 g – 1, 30 g – 2 y 50 g - 3).

Para el caso del CO₂ y CO (Gráficos 3-1 y 3-2), el mejor tratamiento corresponde a la zeolita modificada de masa 50 g, ya que registra la menor concentración final de ambos contaminantes. La tendencia observada en las gráficas en cuanto al material es: “A mayor concentración de HCl empleada para la modificación de zeolita, mayor es la remoción de contaminantes”, y en lo referente a la masa: “A mayor masa del material, mejor es el rendimiento en la adsorción”. Con relación a la concentración de HC (Gráfica 3-3), el mejor tratamiento coincide con el de los otros contaminantes analizados. Sin embargo, no se identifica una tendencia marcada en cuanto al material y a la masa empleada.

La eficiencia de un determinado material como adsorbente depende básicamente de su superficie específica. En tal virtud los mejores adsorbentes tienen una alta porosidad y sus partículas son de tamaño fino (Franco et al., 2018, párr. 18), aspecto que se logra a través de tratamientos como la desaluminización con ácidos.

CONCLUSIONES

- El filtro diseñado y construido en el presente trabajo de Titulación, conlleva a la reducción de entre el 4,95 al 49,49% de CO₂ dependiendo del material adsorbente utilizado. Paralelamente disminuye la concentración de monóxido de carbono e hidrocarburos emitidos en un menor porcentaje.
- Se amplió el diámetro de poro del material zeolítico mediante procesos físico-químicos para una mejor adsorción de CO₂. A través de las pruebas se corroboró que a mayor concentración de HCl empleado en el proceso de desaluminización, aumenta la capacidad de adsorción de la zeolita. Por lo tanto, el mejor tratamiento es la zeolita modificada 0,5 N (50 g).
- Al comparar los valores obtenidos con el marco legal nacional e internacional se identifica que para el caso de % CO₂ + % CO, la prueba realizada sin el filtro y con zeolita natural (15g) excedieron el rango permisible, y para los contaminantes CO y HC, todos los tratamientos se encontraban fuera de norma, esto en base al análisis del porcentaje de CO₂ y otros contaminantes (CO y HC) en un motor de combustión interna con el filtro y en otro sin el filtro.

RECOMENDACIONES

- Con la finalidad de reducir el efecto de errores sistemáticos es necesario verificar el estado, así como la calibración de los equipos de medición.
- Se debe considerar otras pruebas de caracterización de zeolitas, a fin de determinar las impurezas presentes en la muestra (cualitativa y cuantitativamente).
- En base al presente estudio por medio de pruebas dinámicas, se podría complementar nuevos datos puesto que el régimen de aceleración y porcentaje de carga del motor generan variaciones en las emisiones de contaminantes atmosféricos.
- Con el objeto de medir con precisión la cantidad de material adsorbido se puede implementar otro tipo de pruebas (desorción del CO₂ y cuantificación).

GLOSARIO

Albita: Feldespato sódico que corresponde a la fórmula $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$. (Ruíz, 2016, pp. 56)

Equivalente químico: Está asociado con un mol de la función química con la cual interviene o actúa una determinada sustancia. (Brito, 2006, pp. 41)

Espectroscopía Infrarroja: Se basa en la absorción de radiación infrarroja por las moléculas, una vez que las moléculas absorben dicha energía, éstas comienzan a vibrar. Existen dos tipos de vibraciones: tensión y flexión. Las vibraciones de tensión generan cambios en la distancia interatómica, mientras que las vibraciones de flexión ocasionan cambios en los ángulos de los enlaces entre dos átomos. (Universidad del País Vasco, 2006, párr. 1-2)

Heulandita: Grupo de zeolitas que se caracterizan por tener una estructura de tipo laminar, la misma que se refleja en su morfología tabular. (Rodas, 2011, pp. 16)

Hidrotalcita: También denominados hidróxidos laminares, cuya fórmula genérica es $[\text{M}^{2+}_{1-x} \text{M}^{3+}_x \text{OH}^-_2]^{x+} [\text{A}^{n-}_{x-n} \cdot \text{H}_2\text{O}]^{x-}$, donde M^{2+} y M^{3+} corresponde a cationes di y trivalentes respectivamente. Su estructura en general se deriva de la brucita $\text{Mg}(\text{OH})_2$, siendo el Mg^{2+} de tipo octaédrico. (Oviedo et al, 2017, pp. 341)

BIBLIOGRAFÍA

ARÉVALO, C. y AZUERO, E., 2019. Modificación y caracterización de zeolitas y por tratamiento hidrotérmico. S.l.: Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A.

ARROBA, L. y JIMÉNEZ, D., 2012. “Implementación de un sistema de tratamiento de gases de escape mediante inyección de aire en un vehículo a gasolina”. S.l.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

ARROYO, F. y MIGUEL, L., 2019. Análisis de la variación de las emisiones de CO₂ y posibles escenarios al 2030 en Ecuador. *Espacios*, vol. 40, no. 13.

AUGERI, F., 2011. Análisis de los gases de escape de los motores de combustión interna. *CISE electrónica* [en línea]. Disponible en: <http://www.cise.com/portal/notas-tecnicas/item/302-análisis-de-los-gases-de-escape-de-los-motores-de-combustión-interna.html>.

BENAVIDES, H. y LEÓN, G., 2007. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. . S.l.:

BIRGERSSON, H., BOUTONNET, M., JARAS, S. y ERIKSSON, L., 2004. Deactivation and regeneration of spent three-way automotive exhaust gas catalysts (TWC). *Topics in Catalysis*, vol. 30, pp. 433-437.

BRITO, F., 2006. Apuntes sobre el equivalente químico. *An. Quím.*, vol. 102, no. 3, pp. 41-42.

CÉSPEDES, M., RODRÍGUEZ, I., PETRANOVSKII, V., RIZO, R. y AGUILERA, R., 2011. Zeolitas naturales de diferentes yacimientos cubanos: composición y estabilidad química y térmica. *Revista Cubana de Química*, vol. XXIII, no. 1.

CONDORI, J., 2015. Mantenimiento, reciclaje y renovación de catalizadores de automóviles. *Revista Tecnológica*, vol. 11, no. 17.

COSTAFREDA, J., 2011. Tectosilicatos con características especiales: Zeolitas naturales. S.l.: s.n. ISBN 978-84-694-4481-8.

CURI, A., GRANDA, W., LIMA, H. y SOUSA, W., 2006. Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Minero. *Información Tecnológica*, vol. 17, no. 6, pp. 111-118.

EPA, 1999. Zeolita, un adsorbente versátil de contaminantes del aire. . S.l.:

ESPINOZA, M.Á., PANIAGUA, L. y TORRES, M., 2020. Caracterización de clinoptilolita para adsorción de CO₂. Rinderesu, vol. 5, no. 2, pp. 592-599.

ESPINOZA, Y., OLMOS, J. y HERNÁNDEZ, C., 2016. Zeolitas Naturales: Una Alternativa para la Remediación Ambiental. Knowledge,

FANGYUAN, Z., 2014. Efecto de la concentración de naoh en la desilicación de la zeolita HY en catalizadores Pt/HY para hidrocrackeo de poliestireno en disolución. S.l.: Universidad del País Vasco.

FLORES, E., MIRANDA, M. y VILLASÍS, M., 2017. El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. Estadística inferencial. Rev Alerg Mex, vol. 6, no. 3, pp. 364-370.

FOND, N., 2014. Historia del Automóvil. Un Reglamento para circular. S.l.: Universidad Miguel Hernández de Elche.

FRANCO, R., HERNÁNDEZ, M., PORTILLO, R., PETRANOVSKII, V., RUBIO, E. y QUIROZ, K., 2018. Adsorción de CO₂, H₂ y CH₄ en zeolitas naturales de poro angosto. Rev. Int. Contam. Ambie., vol. 34, no. 4, pp. 685-696.

FRESNEDA, C., 2018. Las emisiones de CO₂ se disparan en 2018. El Mundo [en línea]. 6 diciembre 2018. Disponible en: <https://www.elmundo.es/ciencia-y-salud/ciencia/2018/12/06/5c0934f6fdddff03518b4717.html>.

FUNDACIÓN AQUAE, 2018. Suben las emisiones globales de Dióxido de Carbono en 2018. [en línea]. Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/las-emisiones-de-co2-aumentaron-en-2018/>.

GARCÍA, M. del C., 2002. Regeneración de zeolita clinoptilolita empleada para la remoción de amonio. S.l.: Universidad Autónoma del Estado de México.

HERNÁNDEZ, M., PORTILLO, R., SALGADO, M., ROJAS, F., PETRANOVSKII, V., PÉREZ, G. y SALAS, R., 2010. Comparación de la capacidad de adsorción de CO₂ en

clinoptilolitas naturales y tratadas químicamente. Superficies y vacío, vol. 23.

INEC, 2018. Anuario de Transporte 2018. ,

INSTITUTO MEXICANO DE TRANSPORTE, 2010. Los vehículos automotores como fuentes de emisión. ,

JORQUES, B., 2013. Las algas se «comen» el dióxido de carbono: Reduce el CO₂ de tu coche con un sencillo filtro para el tubo de escape. [en línea]. 2013. Disponible en: https://www.lasexta.com/tecnologia-tecnoplora/gadgets/reduce-co2-coche-sencillo-filtro-tubo-escape_2013090557f77b9d0cf2fd8cc6aa713d.html.

LARA, C., MENDOZA, J., LÓPEZ, M., TÉLLEZ, R., MARTÍNEZ, W. y ALONSO, E., 2009. Propuesta metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades de la República Mexicana. . S.l.:

LLANES, E., ROCHA, J., PERALTA, D. y LEGUÍSAMO, J., 2018. Evaluación de emisiones de gases en un vehículo liviano a gasolina en condiciones de altura. Caso de estudio Quito, Ecuador. Enfoque UTE, vol. 9, no. 2, pp. 149-158.

LÓPEZ, M., HERNÁNDEZ, M., BARAHONA, C., MARTÍNEZ, M., PORTILLO, R. y ROJAS, F., 2010. Propiedades fisicoquímicas de la clinoptilolita tratada con fertilizantes a usar como aditivo en el cultivo de *Pleurotus ostreatus*. Terra Latinoamericana, vol. 28, no. 3, pp. 247-254.

MAQUITUVE S.L., 2019. Analizador de gases Maha MET 6.3. [en línea]. Disponible en: <https://maquituve.es/D/product/analizador-de-gases-maha-met-6-3/>.

MARTÍN, J., 2004. Adsorción física de gases y vapores por carbones. S.l.: s.n. ISBN 84-86809-33-9.

MICHON, R., 2016. ¿Qué emite más dióxido de carbono? ¿Los volcanes o la actividad humana? Climate.org [en línea]. Disponible en: <https://www.climate.gov/news-features/climate-qa/¿qué-emite-más-dióxido-de-carbono-¿los-volcanes-o-la-actividad-humana>.

MONTES, A., FUENTES, N., PERERA, Y., PÉREZ, O., CASTRUITA, G., GARCÍA, S. y GARCÍA, M., 2015. Caracterización de clinoptilolita natural y modificada con Ca²⁺ por

distintos métodos físico-químicos para su posible aplicación en procesos de separación de gases. Superficies y Vacío, vol. 28, no. 1.

MORANTE, F., 2004. Las zeolitas de la costa de Ecuador (Guayaquil): geología, caracterización y aplicaciones. S.l.: Universidad Politécnica de Madrid.

MORANTE, F., RAMOS, V., MONTALVÁN, J. y GUERRERO, J., 2005. Obtención de Zeolita Sintética Clinoptilolita en Condiciones de Laboratorio. ESPOL, vol. 18, no. 1.

OVIEDO, E., AYRAULT, P., BRUNET, S. y LINARES, C., 2017. Síntesis y caracterización de hidrotalcitas terciarias y sus óxidos: $Me^{2+} Fe^{3+} Al^{3+}$ ($Me^{2+} = Co^{2+}, Mg^{2+}, Ni^{2+}$ o Zn^{2+}). Ingeniería UC, vol. 24, no. 3, pp. 341-350.

PEDRAZA, J., MARTÍNEZ, L., SUÁREZ, L., ROJAS, N., RAMÍREZ, J., MEJÍA, A., CANO, D., CHAVARRIO, J. y CASALLAS, J., 2018. Métodos de captura de CO₂: Innovando contra el cambio climático. Innovación y ciencia, vol. XXV, no. 1.

QUISPE, A., CABRERA, S., BLANCO, M., VILLCA, L., QUISPE, E. y GARCÍA, G., 2019. Caracterización mineralógica y cristalografía de zeolitas naturales bolivianas. Rev. Bol. Quim, vol. 36, no. 3.

RACINES, A., 2018. Análisis de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero mediante descomposición aeróbica de residuos industriales en mezcla con residuos pecuarios. S.l.: Universidad Andina Simón Bolívar.

RIVEROS, H., CABRERA, E. y MARTÍNEZ, J., 2009. Emisiones Vehiculares. . S.l.:

ROCHA, J., ZAMBRANO, D., PORTILLA, Á., ERAZO, G., TORRES, G. y LLANES, E., 2018. Análisis de Gases del Motor de un Vehículo a través de Pruebas Estáticas y Dinámicas. Revista Ciencia UNEMI, vol. 11, no. 28, pp. 97-108.

RODAS, M., 2011. Tectosilicatos - Zeolitas. ,

ROJAS, E., ROMERO, V. y PANCHAS, J., 2019. Análisis del comportamiento de las emisiones de CO₂, CO y del factor lambda de un vehículo con sistema de inyección convencional con catalizador y sin catalizador. Revista de Ciencia y Tecnología Ingenius, vol. 23, pp. 23-29.

ROJAS, M., CARABALLO, M., ÁLVAREZ, O. y VIVANCO, S., 2018. Emisión de dióxido de carbono de vehículos automotores en la ciudad de Loja, Ecuador. CEDAMAZ, vol. 8, pp. 23-29.

RUÍZ, A., 2016. Síntesis de materiales zeolíticos utilizando zeolita natural clinoptilolita para la captura de dióxido de carbono. S.l.: Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C.

SALVADOR, J., 2018. Análisis aerodinámico regional mediante técnicas de CFD de un semirremolque tipo plataforma y su incidencia con el consumo de combustible. S.l.: Universidad Internacional SEK.

SÁNCHEZ, L., FABELA, M., FLORES, O., HERNÁNDEZ, J., VÁZQUEZ, D. y CRUZ, M., 2019. Revisión de la normativa internacional sobre límites de emisiones contaminantes de vehículos de carretera. . S.l.:

SERVICIO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, 2017. NTE INEN 2204: Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres que emplean gasolina. ,

UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO, 2006. Espectroscopia Infrarroja [IR]. [en línea]. Disponible en: <http://www.ehu.es/imacris/PIE06/web/IR.htm>.

VEGARA, J., BUSOM, I., COLLEDERFORMS, M. y GUERRA, A., 2013. El cambio climático: Análisis y Política Económica. Barcelona: s.n.

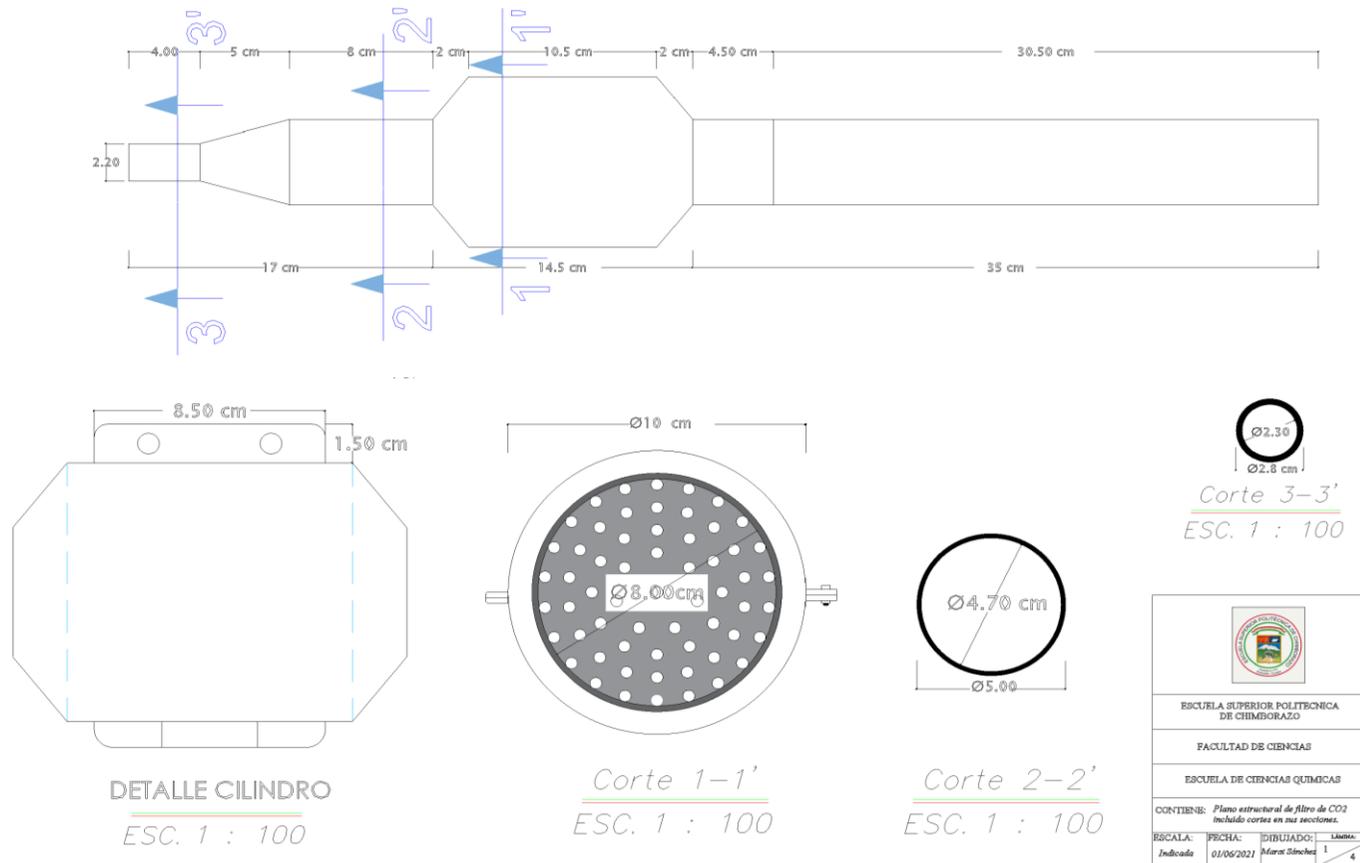
XIMÉNEZ, M., 2004. “Caracterización de minerales zeolíticos mexicanos”. S.l.: Universidad Autónoma del Estado de México.

ZAMBRANO, E., 2019. “Estudio de las propiedades de la ceniza proveniente de la combustión en la caldera de la empresa Endesa-Botrosa para la obtención de zeolita”. S.l.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

ANEXOS

ANEXO A: VISTA GENERAL DEL FILTRO

VISTA GENERAL DEL FILTRO



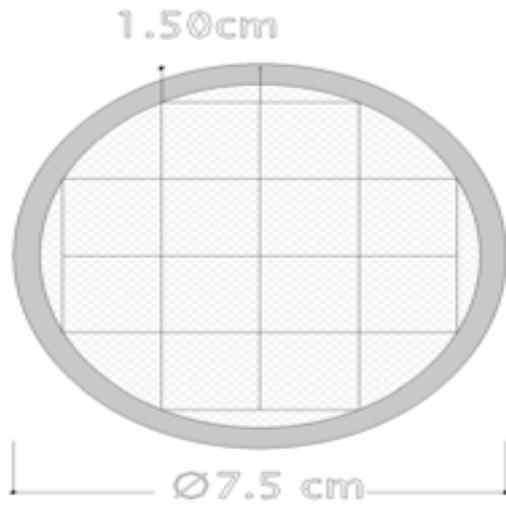
ANEXO B: VISTA TRIDIMENSIONAL DEL FILTRO



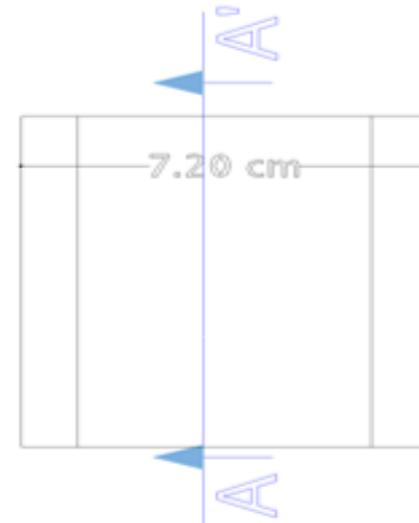
VISTA TRIDIMENSIONAL DEL FILTRO

			
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO			
FACULTAD DE CIENCIAS			
ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS			
CONTIENE: <i>Plano estructural de filtro de CO2 incluido cortes en sus secciones.</i>			
ESCALA:	FECHA:	DIBUJADO:	LÁMINA:
<i>Indicada</i>	01/06/2021	<i>Morad Sánchez</i>	2 / 4

ANEXO C: VISTA GENERAL DEL PANEL DE ACERO



CORTE A - A'
ESC. 1 : 100



DETALLE CAPSULA
ESC. 1 : 100

VISTA GENERAL DEL PANEL DE ACERO

			
UNIVERSIDAD SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO			
FACULTAD DE CIENCIAS			
ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS			
CONTIENE: <i>Plano estructural de filtro de CO2</i> <i>incluido como anexo en las secciones.</i>			
ESCALA:	FECHA:	DIBUJADO:	REVISADO:
Indicada	02/09/2021	Diego Sánchez	3 / 4

ANEXO D: VISTA TRIDIMENSIONAL DEL PANEL DE ACERO

VISTA TRIDIMENSIONAL DEL PANEL DE ACERO



			
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO			
FACULTAD DE CIENCIAS			
ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS			
CONTIENE: <i>Plano estructural de filtro de CO2 Incluido cortes en sus secciones:</i>			
ESCALA:	FECHA:	DIBUJADO:	SEÑALA:
Indicada	01/06/2021	Mora Sánchez	4 4



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL**

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 27 / 09 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Marat David Sánchez Salao</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: <i>Ciencias</i>
Carrera: <i>Ingeniería en Biotecnología Ambiental</i>
Título a optar: <i>Ingeniero en Biotecnología Ambiental</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: <i>Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc.</i>

**LEONARDO FABIO
MEDINA NUSTE**

Firmado digitalmente por
LEONARDO FABIO MEDINA
NUSTE
Fecha: 2021.09.27 11:54:00
-05'00'



1831-DBRA-UTP-2021