



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**Propuesta de obtención de pellets de carbón-arcilla-zeolita
para la remediación de suelos afectados por actividades
mineras**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MINAS

Autor:

KEVIN GERMAN FERNÁNDEZ ÁVILA

Director:

FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA

Cuenca-Ecuador

DEDICATORIA

A toda mi familia en especial a mis padres Germán y Cecibel quienes son los pilares de mi vida, gracias por su amor, consejos y apoyo incondicional en todos los momentos de mi vida, a mis hermanos Gaby, Paz, Pedro por llenar de luz todos los días, a mis sobrinas Emi, Sofi y a Jorge.

A mis amigos con quienes se compartió una sonrisa que llenaron esta meta de gratos recuerdos inolvidables.

En memoria de todas las víctimas que perdieron la batalla en la pandemia (+).

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Universidad del Azuay, sus docentes y a mi tribunal por haber compartido su conocimiento, experiencia y amistad para desarrollar el presente trabajo y ser buenos profesionales con ética inquebrantable.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
ÍNDICE DE CONTENIDOS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	10
ÍNDICE DE ANEXOS	11
RESUMEN.....	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14
CAPÍTULO I.....	15
MARCO TEÓRICO	15
1.1 Tratamiento de metales pesados.....	18
1.1.1 Procesos físicos	19
1.1.2 Procesos químicos	19
1.1.3 Procesos biológicos	19
1.2 Técnicas tratamiento de metales pesados	19
1.2.1 Técnicas convencionales de tratamiento de metales pesados	19
1.2.1.2 Electrodiálisis.....	20
1.2.2 Técnicas no convencionales de tratamiento de metales pesados	22
1.2.3 Fitorremediación.....	23
1.3 Biocarbones	23
1.3.1 Acción en metales pesados	25
1.3.2 Mecanismos por los que se puede producir la retención de elementos metálicos en los biochars	26
1.3.1 La pirólisis.....	28

1.4 Arcillas.....	29
1.4.1 Estructura molecular de arcillas.....	31
1.4.2 Superficie específica.....	37
1.4.3 Capacidad de intercambio catiónico (CIC).....	37
1.5 Zeolitas	38
1.5.1 Propiedades de las zeolitas	41
1.5.1.1 Porosidad	41
1.5.1.2 Adsorción	42
1.5.1.3 Intercambio iónico (I.I)	42
1.5.1.4 Tratamiento de efluentes mineros.....	43
1.5.1.5 Tratamiento de drenaje ácido de mina.....	44
1.5.1.6 Tratamiento de efluentes metalúrgicos	45
1.5.1.7 Tratamiento de contaminación por mercurio.....	46
1.5.1.8 Otros estudios	47
1.6 Adsorción	48
1.7 Capacidad de intercambio catiónico.....	49
1.8 Molienda y chancado.....	50
1.9 Pellets	51
1.9.1 Friabilidad.....	52
1.9.1.1 Método del golpe contra el suelo.....	52
1.9.1.2 Método del golpeteo entre sí	53
1.9.2 Tipos de pelletizadoras	53
1.9.2.1 Principio de prensado por compresión o contricción.....	53
1.9.2.2 Principio de prensado por impacto	56
1.9.2.3 Principio de prensado por extrusión	56
CAPITULO II.....	59
PELETIZACIÓN	59

2.1 Tipificación de 3 materias primas disponibles en la región	60
2.1.1 Arcillas:.....	60
2.1.2 Bio-carbón	60
2.2 Tamizado	61
2.3 Cuarteo	61
2.4 Dosificación de la materia prima.....	61
2.5 Máquina peletizadora	63
2.7 Pruebas de peletización	65
2.7.1 Acondicionamiento del material.....	65
2.8 Peletización.....	66
2.9 Secado de pellets	67
2.10 Análisis de pellets.....	67
2.11 Pruebas de resistencia mecánica de los pellets.....	68
2.12 Pruebas de capacidad de intercambio catiónico	69
CAPITULO III.....	70
ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	70
3.1 Tipificación de las materias primas.....	70
3.1.1 Bio-carbón	70
3.1.2 Arcillas.....	71
3.1.3 Zeolita	73
3.2 Dosificación de la materia prima.....	75
3.3 Parámetros de peletización	75
3.4 Acondicionamiento de pellets	76
3.5 Análisis de pellets.....	77
3.6 Pruebas de resistencia mecánica de los pellets.....	78
3.7 Pruebas de capacidad de intercambio catiónico	79
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81

BIBLIOGRAFÍA.....	84
ANEXOS	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: Bio-carbón bajo un microscopio.....	24
Figura 1. 2: Diversos mecanismos por los que se puede producir la retención de elementos metálicos en los biochars	26
Figura 1. 3: Arcilla bajo el microscopio.....	30
Figura 1. 4: Estructura molecular arcillas	32
Figura 1. 5: Estructura cristalográfica de la zeolita.....	39
Figura 1. 6: Adsorción y absorción	49
Figura 1. 7: Pellets.....	51
Figura 1. 8: Peletizadora industrial Kahl.....	54
Figura 1. 9: Rodillos perpendiculares, matriz plana	55
Figura 1. 10: Prensa briquetadora de rodillos paralelos.....	56
Figura 1. 11: Esquema de prensa briquetadora de pistón con sistema biela-manivela	56
Figura 1. 12: Esquema de acción tomado de comparación de tecnologías de prensa briquetadora.....	57
Figura 1. 13: Peletizadora de tornillo sin fin.....	58
Figura 2. 1: Tratamiento mecánico del bio-carbón	59
Figura 2. 2: Granulometría inicial del bio-carbón.....	60
Figura 2. 3: Bio-carbón molido.....	60
Figura 2. 4: Tamizado del bio-carbón por las mallas # 8, # 10 y # 16.....	61
Figura 2. 5: Dosificación de las nueve muestras.....	62
Figura 2. 6: Dosificación primera muestra.....	62
Figura 2. 7: Homogenización del material.....	63
Figura 2. 8: Máquina peletizadora	64
Figura 2. 9: Tornillo sin fin	64
Figura 2. 10: Acondicionamiento del material.....	65
Figura 2. 11: Homogenización del material.....	65
Figura 2. 12: Pruebas de peletización	66
Figura 2. 13: Pellets de las nueve muestras.....	67

Figura 2. 14: Secado de pellets en el horno	67
Figura 2. 15: Análisis de los Pellets	68
Figura 2. 16: Prueba de friabilidad.....	68
Figura 3. 1: Porcentaje de pérdida de agua	76
Figura 3. 2: Dimensiones pellet	77
Figura 3. 3: Relación friabilidad vs porcentaje de bentonita	79
Figura 3. 4: CIC Muestras 1, 3, 5, 9.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla.1.1: Principales actividades industriales generadoras de metales pesados	16
Tabla 1.2: Fuentes, efectos adversos y valores referenciales del cadmio, cobre y plomo ...	17
Tabla 1.3: Tipos de los tratamientos y tecnologías más apropiadas	18
Tabla 1.4: Tipos de arcillas según su estructura molecular.....	35
Tabla 1.5: Superficie específica	37
Tabla 1.6: CIC arcillas	38
Tabla 1.7: Tipos de zeolita	40
Tabla 2. 1: Características de la máquina peletizadora	63
Tabla 3. 1: Dosificación en porcentaje.....	70
Tabla 3. 2: Características del bio-carbón.....	71
Tabla 3. 3: Características de Bentonita <i>Autor: Ecuaminerales-BENTOTEC</i>	71
Tabla 3. 4: Características de arcilla muestras de Baños	72
Tabla 3. 5: Características de arcilla muestras de Turi	73
Tabla 3. 6: Características físicas y químicas de la zeolita	74
Tabla 3. 7: Dosificación en peso (g)	75
Tabla 3. 8: Parámetros de ensayo 1	75
Tabla 3. 9: Parámetros de ensayo 2.....	75
Tabla 3. 10: Pérdida de humedad según el tiempo de secado	76
Tabla 3. 11: Características pellets ensayo 1.....	77
Tabla 3. 12: Características pellets ensayo 2.....	78
Tabla 3. 13: Índices de friabilidad.....	78

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Dosificación y homogenización muestra 2.....	96
Anexo 2: Dosificación y homogenización muestra 3.....	96
Anexo 3: Dosificación y homogenización muestra 4.....	97
Anexo 4: Dosificación y homogenización muestra 5.....	97
Anexo 5: Dosificación y homogenización muestra 6.....	98
Anexo 6: Dosificación y homogenización muestra 7.....	98
Anexo 7: Dosificación y homogenización muestra 8.....	99
Anexo 8: Dosificación y homogenización muestra 9.....	99
Anexo 9: Prueba de friabilidad Muestra 9	100
Anexo 10: Prueba de friabilidad Muestra 8	100
Anexo 11: Prueba de friabilidad Muestra 7	101
Anexo 12: Prueba de friabilidad Muestra 6	101
Anexo 13: Prueba de friabilidad Muestra 5	102
Anexo 14: Prueba de friabilidad Muestra 4	102
Anexo 15: Prueba de friabilidad Muestra 3	103
Anexo 16: Prueba de friabilidad Muestra 2	103
Anexo 17: Prueba de friabilidad Muestra 1	104
Anexo 18: Análisis pellets.....	104
Anexo 19: Análisis pellets.....	105
Anexo 20: Análisis pellets.....	106
Anexo 21: Matriz pellets	106
Anexo 22: Flujograma del proceso de peletizado	107
Anexo 23: Análisis de CIC muestra 1	108
Anexo 24: Análisis de CIC muestra 3.....	108
Anexo 25: Análisis de CIC muestra 5.....	109
Anexo 26: Análisis de CIC muestra 9.....	109

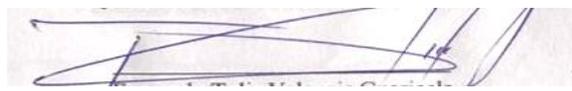
**PROPUESTA DE OBTENCIÓN DE PELLETS DE CARBÓN-ARCILLA-ZEOLITA
PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS AFECTADOS POR ACTIVIDADES
MINERAS**

RESUMEN

El estudio pretende la búsqueda, aplicación y elaboración de nanoadsorbentes alternativos (pellets) a los utilizados actualmente para el control de contaminantes mineros (metales pesados) con el fin de reducir costos y aportar soluciones medioambientales sostenibles, se dosificaron arcillas y zeolitas locales capaces de aglutinar un bio-carbón que mejore las condiciones físico-químicas de las zonas con presencia de contaminación ambiental derivada de la actividad minera; reteniendo metales pesados gracias las propiedades de adsorción e intercambio iónico de los materiales utilizados.

Para combinar los materiales y sus propiedades se elaboraron pellets con una máquina extrusora, en la cual se probaron distintas concentraciones de bio-carbón-arcilla-zeolita y posteriormente se desarrollaron pruebas de friabilidad y análisis de capacidad de intercambio catiónico. El pellet de mejor desempeño físico químico, correspondió al formulado con 50% de bentonita, 25% de bio-carbón y 25% de zeolita.

Palabras claves: Pellets, bio-carbón, arcilla, zeolita, adsorción, nanoadsorbentes



Fernando Tulio Valencia Guarícela
Director del Trabajo de Titulación



Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Coordinador de Escuela



Kevin Germán Fernández Ávila

Autor

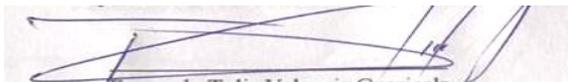
**PROPOSAL TO OBTAIN CHAR-CLAY-ZEOLITE PELLETS FOR
REMEDICATION OF SOILS AFFECTED BY MINING ACTIVITIES**

ABSTRACT

The study deals with the search, application and elaboration of alternative nano- adsorbents (pellets), compared to those currently used for the control of mining pollutants (heavy metals), in order to reduce costs and provide sustainable environmental solutions. For this purpose, local clays and zeolites capable of binding a bio-carbon were dosed, improving the physical-chemical conditions of the areas that present environmental contamination derived from mining activity, with the aim of retaining heavy metals, thanks to the adsorption and ion exchange properties of the materials used.

To combine the materials and their properties, pellets were made in an extruder machine, in which different concentrations of biochar-clay-zeolite were tested. Subsequently, friability tests and analysis of the cation exchange capacity were developed. The pellet that presented the best physical-chemical performance was the one made with a concentration corresponding to 50% bentonite, 25% bio-carbon and 25% zeolite.

Keywords: Pellets, bio-carbon, clay, zeolite, adsorption, nano-adsorbents



Fernando Tulio Valencia Guaricela

Thesis Director



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Faculty Coordinator



Kevin Germán Fernández Ávila

Author

Translated by



Kevin Fernández

Kevin Germán Fernández Ávila

Trabajo de titulación

Fernando Tulio Valencia Guaricela

Agosto, 2020

**PROPUESTA DE OBTENCIÓN DE PELLETS DE CARBÓN-ARCILLA-
ZEOLITA PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS AFECTADOS POR
ACTIVIDADES MINERAS**

INTRODUCCIÓN

Los ambientes contaminados por los desechos peligrosos generados por las industrias atentan contra la salud e integridad de los seres vivos pudiendo ascender en la cadena trófica y bioacumularse en el organismo de los humanos provocando daños físicos y psíquicos, los altos costos de remoción de los contaminantes del medio han impulsado el estudio de diversas técnicas sostenibles y sustentables de tratamientos de contaminantes, es por eso el avance del estudio de la nanotecnología aplicada al medio ambiente que usa las propiedades de los nanoadsorbentes por su efectividad en la remoción de metales pesados y bajo costo.

Con la peletización y dosificación de estas sustancias se combinan y aprovechan sus propiedades adsorbentes, absorbentes, superficie específica y capacidad de intercambio catiónico en un pellet capaz de resistir la fabricación, distribución y uso en diferentes casos según las necesidades de tratamiento, la fabricación se realiza en un sistema extrusor de tornillo sin fin con matriz plana con el que crea un comprimido capaz de remover los contaminantes ya sea del agua, suelo o aire.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

El aumento de la contaminación generada por el hombre en el desarrollo de las industrias, y la peligrosidad de estos residuos, se presentan como una realidad preocupante para la comunidad científica, es por eso que se han desarrollado numerosas técnicas para el tratamiento de estos residuos. La aplicación de la nanotecnología en el contexto de la recuperación medioambiental, es un mecanismo novedoso e innovadora área de estudio, desarrollada para la descontaminación de suelos, aguas superficiales, y aguas subterráneas. Entre las técnicas fisicoquímicas existentes para la depuración de contaminantes más eficientes están los procesos de absorción y adsorción, por sus bajos costos y sostenibilidad en el tiempo.

Los elementos metálicos que están presentes en los ecosistemas acuáticos a muy baja concentración, son denominados elementos traza. Algunos son nutrientes esenciales para las plantas y los animales, micronutrientes (como Mn (Manganeso), Mo (Molibdeno), Cu (Cobre), Co (Cobalto), Zn (Zinc), Sc (Escandio) y V (Vanadio)) mientras que otros elementos (como el Ni (Níquel), Sn (Estaño) y Cr (Cromo)) son esenciales únicamente para los animales. Cuando estos elementos están presentes en sistemas ambientales a concentraciones superiores a ciertos niveles, debido a desequilibrios naturales o por introducción antropogénica, pueden ser tóxicos para los seres vivos (Domenech & Peral, 2008).

Los metales son sustancias de alta densidad, generalmente tóxicos o venenosos para el ser humano, de acuerdo a su concentración.

Industria	Metales	Contaminación derivada
Minería de metales ferrosos	Cd, Cu, Ni, Cr, Co, Zn	Drenaje ácido de mina, relaves, escombreras
Extracción de minerales	As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	Presencia en las menas como en los subproductos
Fundición	As, Cd, Pb, Ti	Procesado del mineral para obtención de metales
Metalúrgica	Cr, Cu, Mn, Pb, Sb, Zn	Procesado térmico de metales
Aleaciones y aceros	Pb, Mo, Ni, Cu, Cd, As, Te, U, Zn	Fabricación, eliminación y reciclaje de metales. Relaves y escoriales
Gestión de residuos	Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Hg, Mn	Incineración de residuos o en lixiviados
Corrosión metálica	Fe, Cr, Pb, Ni, Co, Zn	Inestabilidad de los metales expuestos al medio ambiente
Galvanoplastia	Cr, Ni, Zn, Cu	Los efluentes líquidos de procesos de recubrimiento
Pinturas y pigmentos	Pb, Cr, As, Ti, Ba, Zn	Residuos acuosos procedentes de la fabricación y el deterioro de la pintura vieja
Baterías	Pb, Sb, Zn, Cd, Ni, Hg	Fluido de la pila de residuos, la contaminación del suelo y las aguas subterráneas.
Electrónica	Pb, Cd, Hg, Pt, Au, Cr, As, Ni, Mn	Residuos metálicos acuosa y sólida desde el proceso de fabricación y reciclaje
Agricultura y ganadería	Cd, Cr, Mo, Pb, U, Zn, As, Mn, Cu	Contaminación de escorrentía, aguas superficiales y subterráneas, la bioacumulación planta

Tabla.1.1: Principales actividades industriales generadoras de metales pesados

Fuente: (Rubio, R. A Muñoz, A. Perdomo, & D, 2015)

No todos los metales de densidad alta son especialmente tóxicos en concentraciones normales (algunos de ellos son necesarios para el ser humano). No obstante, hay una serie de metales más conocidos por su tendencia a representar serios problemas medioambientales, el caso del Hg, Fe, Pb, Cd, Cu, Zn, Cr. En ocasiones se incluye, al hablar de contaminación por metales, a otros elementos tóxicos ligeros como el berilio (Be) o el aluminio (Al), o algún semimetal como el arsénico (As)

La peligrosidad de los metales reside en que no pueden ser degradados (ni química, ni biológicamente) y, además, tienden a bioacumularse y a biomagnificarse, lo que significa que se acumulan en los organismos vivos alcanzando concentraciones mayores que la que alcanzan en los alimentos o en el ambiente, estas concentraciones aumentan a medida que ascendemos en la cadena trófica, provocando efectos tóxicos de diverso carácter. En el ser humano se han detectado infinidad de efectos físicos (dolores crónicos, problemas sanguíneos, etc.) y efectos psíquicos (ansiedad, pasividad, etc.) (Sucasaire, 2018)

Metal	Fuentes de contaminación	Efectos adversos en personas	Valores de referencia de la OMS (mg/L) a*
Cadmio	Soldadura, fertilizantes, fungicidas, pesticidas, productos plásticos, colorantes, plantas nucleares, torres de platos para el lavado de gases, galvanoplastia, chapado de metales, bacterias de níquel-cadmio, pinturas, entre otras.	Provocar cáncer, daño renal, destrucción de las membranas mucosas, vómitos, diarrea, daño óseo, enfermedad de itai-itai, afectan la producción de progesterona y testosterona.	0,003
Cobre	Minería, metalurgia, fabricación de productos químicos, preservación de madera, pesticidas, entre otras.	Daño hepático y renal, irritación gastrointestinal, enfermedad de Wilson, insomnio, daño miocárdico, convulsiones, calambres, vómitos, aumento de la presión sanguínea y frecuencia respiratoria.	2
Plomo	Bacterias, plomerías, pinturas, aceites, metales, fertilizantes fosfatados, producción de madera, entre otras.	Anemia, daño en los riñones, deterioro del sistema nervioso, daño a la capacidad de sintetizar proteínas.	0,01

Tabla 1.2: Fuentes, efectos adversos y valores referenciales del cadmio, cobre y plomo

Fuente: (Ramos D. C., Adsorción de Cadmio, Cobre y Plomo en Bentonita, Caolín y Zeolita Naturales y Modificadas: Una Revisión de los Parametros de Operación, Isotermas y Cinética, 2018)

1.1 Tratamiento de metales pesados

La distribución de metales pesados en las aguas estará determinada por diferentes tipos de reacciones, como pueden ser: ácido-base, precipitación/disolución, oxidación/reducción, absorción, adsorción o procesos de intercambio iónico, captación biológica. Uno de los riesgos más importantes que podría darse es su tendencia a ser bioacumulado en las especies marinas y entrar en la cadena trófica pudiendo ser la causa de graves problemas para nuestra salud (Mudho, 2013).

Los contaminantes presentes en aguas residuales se pueden eliminar por diferentes procesos, para elegir la mejor alternativa es necesario conocer los distintos mecanismos y evaluar el que mejor se adapte a la situación.

Crterios	Tipos	Tecnologías
Medio de eliminación	Procesos Físicos	Desbaste/ Flotación/ Absorción / Desarenado/ Sedimentación/ Evaporación/ Desengrasado/
	Procesos Químicos	Floculación y Coagulación/ Neutralización/ Oxidación/ Desinfección/ Intercambio Iónico/ Adsorción
	Procesos Biológicos	Fangos Activos/ Lechos bacterianos, de Turba/ Lagunaje/ Biodiscos
Fase de depuración	Pretratamiento y Tratamiento Primario	Desbaste/ Decantación Primaria/ Desarenador/ Lagunaje anaerobio
	Tratamiento Secundario	Fangos activos/Lagunaje facultativo/ Lagunas aireadas/ Lechos de turba/ Biodiscos
	Tratamiento terciario	Procesos de nitrificación-desnitrificación y de eliminación de fosforo/ biodiscos/ Lechos bacterianos/ lagunaje de maduración, de macrofitas/ Filtros verdes/ ultrafiltración/ Ozonización/ Radiación UV
Coste de la explotación	No Convencionales/ Bajo coste	Sedimentación/ Filtración/ Adsorción/ Precipitación Química/ Intercambio Iónico, junto tratamientos naturales
	Convencionales/ Mayor Coste	Lagunaje/ Laguna de macrófitas/ Filtros verdes/ Lechos de turba y bacterianos/ Biodiscos

Tabla 1.3: Tipos de los tratamientos y tecnologías más apropiadas

Fuente: (Ulloa, 1996)

Según el medio de eliminación, los contaminantes existentes en aguas residuales se pueden eliminar por:

1.1.1 Procesos físicos

En estos métodos se aplican fenómenos físicos, por ejemplo, fuerzas gravitatorias, centrifugas, retención física, etc. y pueden ser tratamientos como: desbaste de sólidos, desengrasado, desarenado, sedimentación, flotación, evaporación y adsorción.

1.1.2 Procesos químicos

Son aquellos en los que se adicionan productos químicos para facilitar reacciones químicas que destruyen o modifican los contaminantes orgánicos. Entre estos podemos incluir: floculación y coagulación, neutralización, oxidación, reducción, intercambio iónico, adsorción y desinfección (cloro, ozono).

1.1.3 Procesos biológicos

En este caso se eliminan contaminantes por la acción de como consecuencia de la actividad de agentes biológicos. Este tratamiento se usa para eliminar las sustancias orgánicas biodegradables (coloidales o disueltas). Entre ellos: fangos activos, lechos bacterianos, lechos de turba, lagunaje y biodiscos (Ulloa, 1996)

1.2 Técnicas tratamiento de metales pesados

El tratamiento de las aguas contaminadas con metales pesados depende de diferentes factores, por ello se ha clasificado en convencionales, aquellas técnicas que se emplean habitualmente para la remoción de contaminantes, y las no convencionales refiriéndose a los procesos innovadores para la eliminación de metales en aguas generalmente de origen industrial.

1.2.1 Técnicas convencionales de tratamiento de metales pesados

1.2.1.1 Filtración por membrana

Esta tecnología presenta altas eficiencias, requiere poco espacio, no es selectiva y es de fácil operación, pero genera una gran cantidad de lodos que contienen metales. Se

emplea en procesos para el tratamiento de agua potable, aguas residuales industriales y en menor medida aguas residuales domésticas. Las membranas pueden clasificarse de acuerdo a diferentes características como su peso molecular de corte, material de la membrana (sintéticos o polímeros naturales modificados, acoplados y estructurados), permeabilidad y solubilidad del soluto y el solvente en la película, superficie y espesor activo de la película, así como la carga de su superficie (Taylor & Wiesner, 2002).

1.2.1.2 Electrodialisis

Es una técnica de descontaminación que puede remover componentes iónicos de soluciones acuosas empleando membranas permeables, selectivas en un campo eléctrico constante (Guastalli, 2004). Esta técnica tiene la capacidad de remover iones contaminantes cargados de hasta 0,0001 μm , mediante hojas o laminas porosas de resinas de intercambio iónico con una baja permeabilidad relativa para el agua (Taylor & Wiesner, 2002).

1.2.1.3 Osmosis inversa

Es un proceso de permeación a través de membrana para la separación por difusión controlada o cribado. Tiene la capacidad de seleccionar elementos de tan solo 0.0001 mm, lo que le otorga un amplio abanico de capacidades de tratamiento (Nemerow & Dasgupta, 2008)

1.2.1.4 Nanofiltración

Es una técnica de tratamiento de agua relativamente reciente que utiliza membranas con poros muy pequeños (funcionamiento en el rango de 10-50 bar. Por lo tanto, las membranas empleadas para la nanofiltración son capaces de retener especies neutras con peso molecular $r < 200-300$ g/mol, y también para rechazar iones inorgánicos por un mecanismo de exclusión por tamaño en combinación con las interacciones electrostáticas entre los iones y la membrana cargada, presenta mayor rechazo de iones divalentes y menor rechazo de iones monovalentes, la presión de funcionamiento más baja, mayor flujo y menor consumo de energía en comparación con la osmosis inversa (González, y otros, 2006). Estas características recomiendan la nanofiltración como una tecnología prometedora e innovadora que puede ser ampliamente aplicada en el agua potable y el tratamiento de efluentes industriales.

1.2.1.5 Intercambio iónico.

Es el proceso a través del cual los iones en solución se transfieren a una matriz sólida que, a su vez liberan iones de un tipo diferente, pero de la misma carga. El intercambio iónico es un proceso de separación física en la que los iones intercambiados no se modifiquen químicamente. Las principales ventajas de intercambio iónico son la recuperación del valor del metal, la selectividad, menos volumen de lodos producidos y la reunión de las especificaciones de descarga estrictas (Zewail & Yousef, 2015).

1.2.1.6 Adsorción (convencional).

La técnica presenta remoción de una amplia variedad de contaminantes, alta capacidad, cinética rápida y posiblemente selectiva dependiendo de adsorbente de lo cual también depende su rendimiento, básicamente por la estructura física del mismo (Liu & Lee, 2014). Los carbones activados, arcillas, biopolímeros, zeolitas, perlas de sílice, y plantas o desechos lignocelulósicos; son algunos de los adsorbentes, generalmente con procesos variados de modificación química (Wan Nghah, Teong, & Hanafiah, 2011), Comúnmente empleados para remover colorantes iónicos, metales pesados, materiales radioactivos entre otros contaminantes orgánicos e inorgánicos generados por diferentes tipos de industrias. (Osei Boamah, y otros, 2015)

1.2.1.7 Bio-carbón activado.

Ha demostrado ser un adsorbente eficiente para la eliminación de una amplia variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el medio ambiente acuático. Debido a sus áreas superficiales porosas que van desde 500 hasta 1.500 m² / g, así como la presencia de un amplio espectro de superficie funcional que la hace accesible a diferentes reactivos (Karnib, Kabbani, Holail, & Olama, 2014)

1.2.1.8 Precipitación química

Es la técnica más utilizada en los procesos industriales ya que es relativamente sencilla de operar, económica y selectiva, aunque su mantenimiento si es costoso debido a la alta generación de lodos. Igualmente se emplea la precipitación por sulfuros aunque con solubilidades bajas y precipitados no anfóteros, por lo que puede lograr altos rendimientos; también se han empleado sustancias quelantes aunque presentan

desventajas considerables como la carencia de uniones necesarias y demasiados riesgos ambientales (Chen Q. L., 2009).

1.2.1.9 Flotación

El proceso de flotación ion se basa en impartir las especies iónicas de metal en las aguas residuales hidrófobas mediante el uso de agentes activos de superficie (tensoactivos) y la posterior eliminación de estas especies hidrófobas por burbujas de aire (Polat & Erdogan, 2007)

1.2.2 Técnicas no convencionales de tratamiento de metales pesados

1.2.1 Adsorbentes de bajo costo y nuevos adsorbentes

La adsorción es un proceso de transferencia de masa por el cual una sustancia se transfiere desde la fase líquida a la superficie de un sólido. El proceso de adsorción describe en realidad un grupo de procesos, que incluyen la adsorción y las reacciones de precipitación. Recientemente, la adsorción se ha convertido en uno de las técnicas alternativas de tratamiento para las aguas residuales cargadas con metales pesados (Wan Ngah, Teong, & Hanafiah, 2011). Se emplea un amplio espectro de materiales biológicos, especialmente las bacterias, algas, levaduras y hongos han recibido una atención creciente para la eliminación y recuperación de metales pesados, debido a su buen rendimiento, bajo coste y grandes cantidades disponibles (Wang & Chen, 2009) (Anastopoulos & Kyzas, 2015).

1.2.2 Adsorción de metales pesados por materiales naturales agrícolas e industriales

Los procesos de adsorción están siendo investigados por su uso en la retención de metales pesados por ser una alternativa de bajo costo, disponible comercialmente y segura, a pesar del uso en el tratamiento de aguas el bio-carbón activado este sigue siendo costoso para la industria. Por lo tanto, existe una urgente necesidad de que todas las fuentes posibles de los adsorbentes de bajo costo basados en la agroindustria deben explorarse y su viabilidad para la eliminación de metales pesados debe ser estudiada en detalle (Ahmed, 2013).

1.2.3 Fitorremediación.

Es el uso de las plantas y los microbios del suelo asociados para reducir las concentraciones o los efectos tóxicos de los contaminantes en los ambientes. Es una tecnología relativamente reciente y se percibe como rentable, eficiente, respetuoso del medio ambiente, y la tecnología solar-impulsado con buena aceptación del público (Ali, Khan, & Anwar, 2013). Estas fitotecnologías ofrecen numerosas ventajas en relación con los métodos físicoquímicos que se usan en la actualidad, por ejemplo, su amplia aplicabilidad y bajo costo (Delgadillo, González, Prieto, Villagómez, & Acevedo, 2011).

1.2.4 Biopolímeros

Son industrialmente atractivos porque son capaces de reducir las concentraciones de iones metálicos de transición a concentraciones de partes por billón, son ampliamente disponibles y ambientalmente seguros (Barakat, 2011). Poseen un número amplio de diferentes grupos funcionales, tales como hidroxilos y aminas, que aumentan la eficiencia de la absorción de iones metálicos.

1.2.5 Hidrogeles

Son polímeros hidrófilos reticulados capaces de ampliar sus volúmenes debido a su alta expansión en el agua. Por consiguiente, ellos son ampliamente utilizados en la purificación de las aguas residuales (Barakat, 2011); (Hua & Li, 2014) Diversos hidrogeles se han sintetizado e igualmente investigado su comportamiento de adsorción de metales pesados (Rubio, 2015).

1.3 Biocarbones

El bio-carbón puede ser obtenido a partir de subproductos agroforestales o residuos orgánicos urbanos para no comprometer reservas forestales o bosques nativos y, su aplicación al suelo, sustenta una nueva tecnología alrededor del mundo. Está constituido por partículas de diferentes tamaños que dependen de la materia prima de la que se originan (Lehmann, 2011); posee una alta porosidad con micro, meso y macro poros, cuyos tamaños van de <2 nm, 2-50 nm a >50 nm, respectivamente. Los macroporos provienen de los espacios propios de la materia prima original y, los micro

poros, están asociados a la adsorción de compuestos líquidos, sólidos y gases (Escalante, 2016)

El bio-carbón se produce por el calentamiento de materia vegetal en una atmósfera pobre en oxígeno. Por este procedimiento, denominado pirólisis lenta, alrededor del 50% del carbono de la biomasa queda almacenado en el bio-carbón, por lo que resulta un material muy interesante como sumidero de CO₂. El uso del bio-carbón no es nuevo, y el estudio de los suelos amazónicos conocidos como terra preta revela que es un material muy estable que puede permanecer en el suelo entre 500 y 7.000 años. Se conocen beneficios como enmienda relacionados con la mejora de la humedad y de la compactación del terreno, y de la fertilidad en general. También puede ser útil en terrenos ácidos, puesto que incrementa el pH del terreno. (Manuel Olmo, 2016).

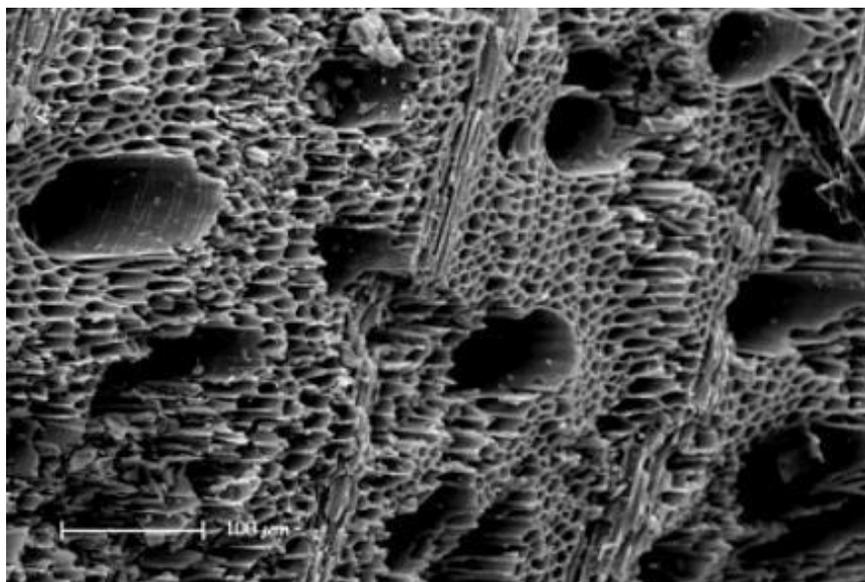


Figura 1. 1: Bio-carbón bajo un microscopio.

Fuente: Brownsrt, Reino Unido Biochar Research Center

El bio-carbón es un material similar al carbón vegetal común en aspecto y propiedades, pero que tiene unas capacidades añadidas interesantes para la comunidad científica. Se puede emplear para la captura de carbón, que de otra manera terminaría en la atmósfera como CO₂ contribuyendo al efecto invernadero. Además, su uso, combinado con fertilizantes, puede modificar las propiedades del terreno.

1.3.1 Acción en metales pesados

El uso en la remediación de metales pesados, ha mostrado una alta eficacia. El efecto de la incorporación de bio-carbón producido a partir de paja de arroz en la movilidad y la biodisponibilidad de Cobre (II) y Plomo (II) presentó una reducción del ácido extraíble del 19.7 % al 100 % para cobre y del 18.8 % al 77.0 % para plomo, aumentando la dosis de adición del bio-carbón. Los mecanismos de eliminación de metales pesados con bio-carbón modificado se atribuyen principalmente a las interacciones electrostáticas, precipitación y otras reacciones. (Pinilla., 2014)

La capacidad de adsorción de compuestos orgánicos en el BC (bio-carbón) dependerá principalmente de la superficie específica, porosidad y los grupos funcionales presentes en la superficie del mismo. Estas propiedades están altamente influenciadas por las condiciones de pirólisis, el contenido en carbono aromático, y la materia prima utilizada (Keiluweit, 2010). Las características similares que presentan el bio-carbón y el bio-carbón activo lo hacen muy interesante para su uso como adsorbente de contaminantes en el tratamiento de agua y como remediación del suelo (Zhang, 2013); (Ahmad, 2014). En general, los biocarbones preparados a temperaturas de pirólisis superiores a 500°C, se hacen más aromáticos y su polaridad disminuye como consecuencia de la pérdida de grupos funcionales, pudiendo afectar a la adsorción de compuestos orgánicos. Por el contrario, los BC preparados a bajas temperaturas (<300°C), se caracterizan por tener una baja superficie específica, y mayor presencia de grupos funcionales en su superficie, lo que implica, interacciones específicas en la superficie del BC (Dechene, 2014). El incremento en la capacidad de adsorción está relacionado con el aumento de la temperatura de preparación de los BC que se caracterizan por su de alta aromaticidad y baja polaridad (Chen B. D., 2008) (Wang F. X., 2016).

La aplicación de biocarbones para la remediación de aguas contaminadas por metales pesados ha sido ampliamente estudiada (Lima, 2010) (Tong, 2011) (Lu, 2012). La capacidad de adsorción de compuestos inorgánicos en BC se debe principalmente a mecanismo de intercambio catiónico, precipitación y a fuerzas de atracción electrostática y dependerá por tanto, de la facilidad que posea el metal para intercambiarse o precipitarse, etc.

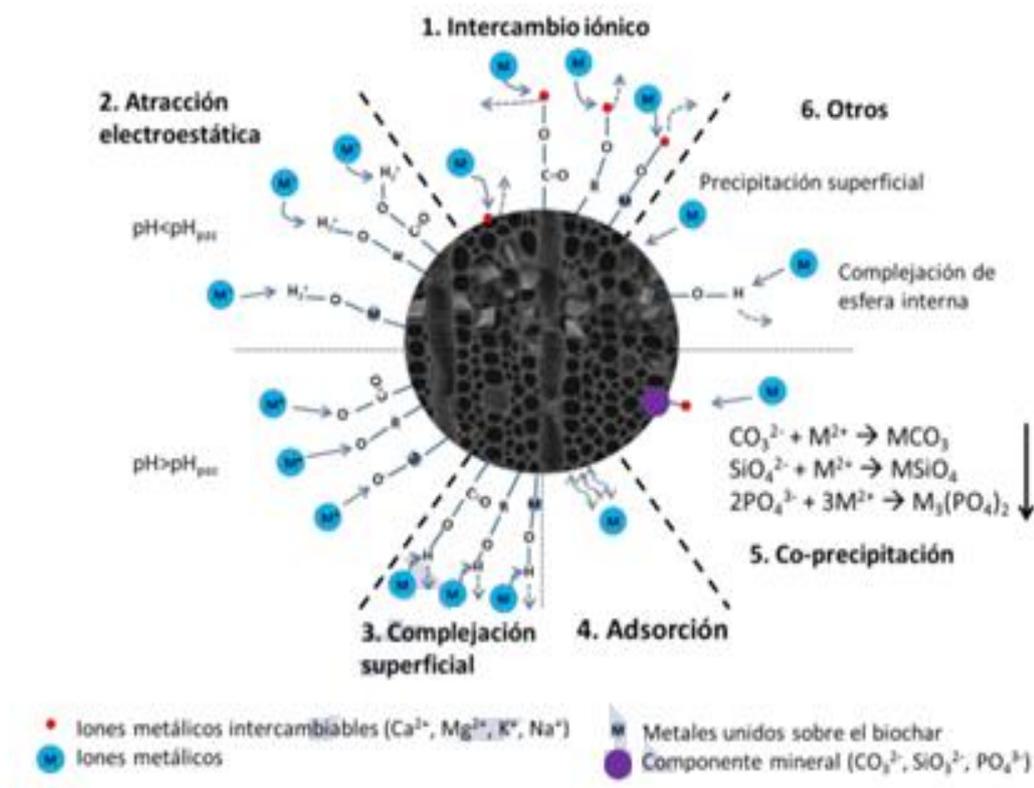


Figura 1. 2: Diversos mecanismos por los que se puede producir la retención de elementos metálicos en los biochars

Fuente: (Tan, 2015)

1.3.2 Mecanismos por los que se puede producir la retención de elementos metálicos en los biochars

1. La complejación órgano-metálica es un proceso de interacción entre la materia orgánica natural con los cationes metálicos presentes en disolución, estableciéndose un enlace covalente entre ambos (Tipping, 2002). El empleo de enmiendas orgánicas, además de aumentar la capacidad de acumulación de agua en el suelo, permite aumentar el contenido de C y nutrientes, favorece la estructura física y produce una disminución en la biodisponibilidad de cationes potencialmente tóxicos (Adriano, 2001) (Wong, 2003); (Larney, 2012).

La aplicación combinada de enmiendas orgánicas y materiales alcalinizantes en escombreras conlleva la acumulación de material orgánica, el desarrollo de microestructura y el aumento del microbiota en los suelos (Zanuzzi, 2009) (Arocena, 2012). Por otro lado, no todo tipo de material orgánico se comporta de igual forma. Dependiendo del tipo de C y sus propiedades, se favorece la

retención de un elemento u otro, pudiendo incluso llegar a movilizar contaminantes a la disolución, como por ejemplo el As (Kumpiene, 2008); (Bolan, 2014).

2. La precipitación o coprecipitación es la formación de una fase sólida a partir de los componentes presentes en la fase acuosa. Estos procesos están controlados por las condiciones de pH, Eh y T^a, así como por la concentración de elementos en el medio. La precipitación se emplea para inmovilizar contaminantes a través de la adición de materiales encalantes (calizas, dolomitas, cenizas), lo que favorece la formación de fases sólidas con diferentes solubilidades, i.e. carbonatos, fosfatos, sulfatos y óxidos o hidróxidos metálicos (Kumpiene, 2008) (Bolan, 2014). En ambientes con generación de drenaje ácido la aplicación de esta solución es temporal, ya que se favorece el proceso opuesto, la disolución de las fases minerales o se generan fases con una mayor solubilidad (Pérez-López, 2009) (Santos, 2009)
3. Los procesos de intercambio iónico controlan la concentración de nutrientes y de elementos tóxicos presentes en la disolución del suelo. Este proceso, especialmente relevante en el caso de arcillas 2:1 y de la materia orgánica natural, se refiere al intercambio de un ion presente en la superficie por otro de ion de igual carga presente en la disolución (White, 2013b). Por ejemplo, el uso de enmiendas orgánicas favorece los procesos de intercambio en suelos contaminados y escombreras, siendo un proceso importante en el control de nutrientes y elementos contaminantes (Bolan, 2014) (Adriano, 2001) ; (Madeira, 2012).
4. La adsorción es uno de los procesos físico-químicos de mayor importancia en suelos y aguas, ya que controla la movilidad, transporte y disponibilidad de nutrientes y contaminantes en el medio (Essington, 2005). La retención o inmovilización de nutrientes y contaminantes en suelos a través de este proceso, viene dado por la presencia de la materia orgánica natural y los óxidos o hidróxidos minerales (Fe, Al o Mn) (Sparks, 2003). Las reacciones de adsorción entre los componentes en disolución y la fase sólida implica mecanismos físicos y químicos, entre otros la formación de complejos superficiales, interacciones electrostáticas o interacciones hidrofóbicas

(Sparks, 2003) (White, 2013b). Cambios en las condiciones físico-químicas del medio (pH, Eh y T^a) o la presencia de otros elementos en disolución puede favorecer la adsorción o producir la desorción de aquellos elementos inicialmente adsorbidos, pasando nuevamente a la fase acuosa con los consiguientes efectos negativos sobre el ecosistema (Antelo J. A., 2015) (Antelo J. A., 2005); (Kanematsu, 2013); (Otero-Fariña, 2017)

5. Las reacciones de oxidación-reducción son procesos de gran importancia en suelos y aguas, ya que definen la especiación química, dinámica y peligrosidad de las especies químicas presentes. La adición de enmiendas (materia orgánica, materiales alcalinos, óxidos minerales) pueden producir cambios en el potencial redox y el pH en el medio, y consecuentemente en la disponibilidad o movilidad de las especies químicas (Adriano, 2001); (Guha, 2001) (Fernandes, 2002).

1.3.1 La pirólisis

La pirólisis es una descomposición térmica que ocurre en ausencia de oxígeno. La pirólisis siempre es el primer paso en los procesos de combustión y gasificación, seguido de una oxidación total o parcial de los productos primarios.

Los mecanismos o etapas de formación del bio-carbón durante el proceso de pirólisis son principalmente tres (Demirbas A. , 2000):

Etapa inicial, se trata de la etapa donde se produce la pérdida de humedad mediante la eliminación de agua, seguida de una volatilización de compuestos.

Etapa intermedia, que es aquella donde se produce el denominado bio-carbón primario. Este BC primario se origina tras una volatilización rápida de compuestos orgánicos.

Etapa final, en la cual el BC primario se descompone lentamente formando sólidos residuales con un alto contenido en carbono fijo. Este residuo, se reordena formando el bio-carbón secundario o residuo final (Demirbas A. , 2007).

El proceso de pirólisis lo podemos clasificar en función del incremento temperatura durante el proceso de calentamiento del material pudiendo ser lenta o rápida (Cha,

2016). La pirólisis lenta es aquella en la que el proceso tiene lugar a bajas temperaturas durante un periodo prolongado de tiempo, mientras que en la pirólisis rápida el proceso tiene lugar a mayores temperaturas.

Existen diferentes tipos de pirólisis, cada una de ellas tiene diferentes condiciones en el proceso, lo cual favorece la generación de diferentes productos, para el caso de la madera. La pirólisis es una descomposición térmica que ocurre en ausencia de oxígeno. La pirólisis siempre es el primer paso en los procesos de combustión y gasificación, seguido de una oxidación total o parcial de los productos primarios. El proceso de pirólisis tiene tres etapas: la dosificación y alimentación de la materia prima, la transformación de la masa orgánica y, finalmente, la obtención y separación de los productos (coque, bio-aceite y gas) (PEP, 2003)

La adición de bio-carbón al suelo puede tener varios propósitos, por ejemplo, la mitigación del cambio climático mediante la captación de bio-carbón de la atmósfera. (Lehmann, A handful of carbon., 2007)

Según (Restrepo, 1996) la relación de Carbono/Nitrógeno, la oferta y disponibilidad de las sustancias nutritivas tienen que satisfacer las necesidades de los microorganismos, se aspira una relación de Carbono/Nitrógeno entre 20/40 (C/N).

Debido a la falta de carbono, relación C/N demasiado estrecha, los microbios no pueden producir suficientes sustancias para sus cuerpos. Ellos consumen y por lo tanto fijan menos Nitrógeno, el que puede perderse por causa de esto. En un excedente de Carbono relación C/N de más de 40:1 el Nitrógeno está relativamente en el nivel mínimo y por esto es el factor limitante para el crecimiento de los microorganismos.

1.4 Arcillas

Las propiedades se deben principalmente, a su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 mm), su morfología laminar (filosilicatos), las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar. Como consecuencia de estos factores, presentan, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de

una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

Una propiedad principal es la capacidad de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. (Romero, 2001)

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos procesos que difícilmente se dan de forma aislada:

Absorción: cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad.

Adsorción: cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato (Beltran, 2009)

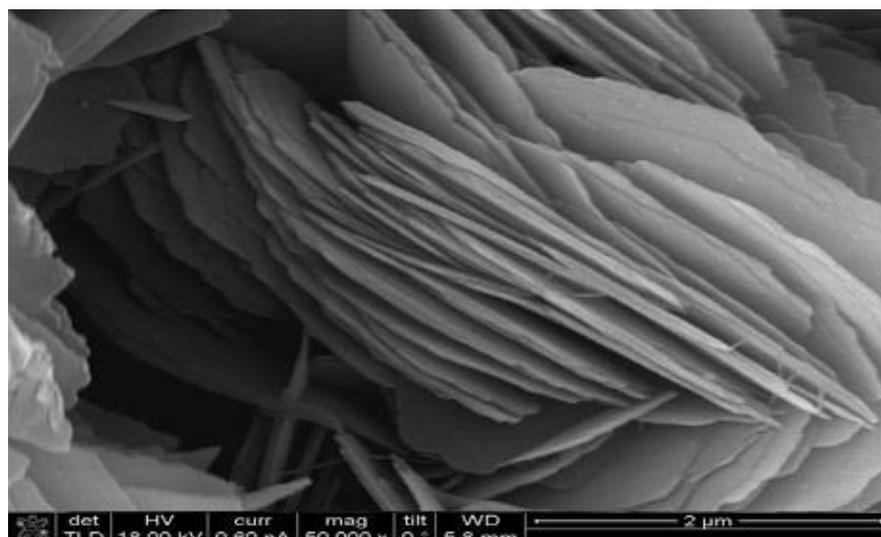


Figura 1. 3: Arcilla bajo el microscopio

Fuente: Holtz & Kovacs. An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice

La estructura interna y composición química de cada mineral de arcilla le confiere unas características muy específicas de reactividad química. La mayor parte de sus propiedades físico químicas derivan de su morfología laminar, tamaño de partícula inferior a dos micras; y, a las sustituciones isomorfas en las láminas que dan lugar a la aparición de carga. Otra propiedad de las arcillas es conocida como la capacidad de intercambio catiónico, que le permite cambiar los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios de las estructuras por otros existentes en las soluciones acuosas (Beltrán, 2009).

La mayoría de los minerales de la arcilla son silicatos hidratados que pertenecen al grupo de los filosilicatos, siendo los de tipo laminar los más abundantes. Su estructura puede derivar de la unión de unidades tetraédricas de SiO y unidades octaédricas de Al- (O, OH) o Mg- (O, OH). Capas bidimensionales de octaédricos se condensan con capas bidimensionales de tetraédricos cuyo apilamiento origina una estructura global del mineral. Estas estructuras pueden ser de dos tipos

1.4.1 Estructura molecular de arcillas

Minerales Tipo 1:1: Cada lámina se forma por la condensación de una capa tetraédrica de silicio condensada a otra de octaédricos de aluminio. Las láminas se unen entre sí por puentes de hidrógeno OH-H de capas adyacentes.

Minerales Tipo 2:1: Formada por dos capas de silicio condensadas, una a cada lado, a una capa de octaedros. La unión entre láminas tiene lugar a través de fuerzas de van der Waals entre átomos de O de capas adyacentes. Los grupos tetraédricos (SiO)₄⁴⁻ se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando láminas de extensión infinita y de forma (Si₂O₅)²⁻, que constituyen la unidad fundamental de los silicatos. Estas capas pueden ser eléctricamente neutras, pero en la mayoría de los casos poseen una carga negativa permanente. El origen de esta carga está en las sustituciones isomórficas de cationes como el Si⁴⁺ de las capas tetraédricas por otros cationes de un tamaño parecido, pero de inferior carga, como por ejemplo el Al³⁺. También se pueden dar sustituciones en la capa octaédrica, como por ejemplo de Al³⁺ por Mg²⁺. (M. Moreno, 2006)

Además, en medio ácido pueden existir sitios con carga positiva que se atribuyen a

grupos hidroxilos básicos protonados de los bordes de las capas octaédricas. Las sustituciones isomórficas son más numerosas y variadas en el caso de los minerales del tipo 2:1, de hecho, este tipo de minerales puede clasificarse atendiendo a la carga negativa permanente de las láminas. Esta carga negativa está compensada por cationes inorgánicos más o menos hidratados que se sitúan en las láminas del mineral y en los bordes y que pueden o no, ser intercambiables. Por ello, los minerales del tipo 2:1, también denominados esmectitas, se clasifican en grupos atendiendo a la carga negativa permanente de las láminas. El contenido de K^+ (no intercambiable) en el espacio interlamina del mineral aumenta siguiendo el orden: esmectitas < vermiculitas < ilitas < micas, por ello las esmectitas son las que tienen mayor capacidad de intercambio catiónico y de expansibilidad de sus láminas por hidratación de sus cationes intercambiables. (M. Moreno, 2006)

Las arcillas son sólidos de superficie polianiónica constituidas por láminas moleculares con arreglos tetraédricos de sílice y octaédricos de alúmina. Estos arreglos se encuentran unidos covalentemente en relación Si: Al (2:1).

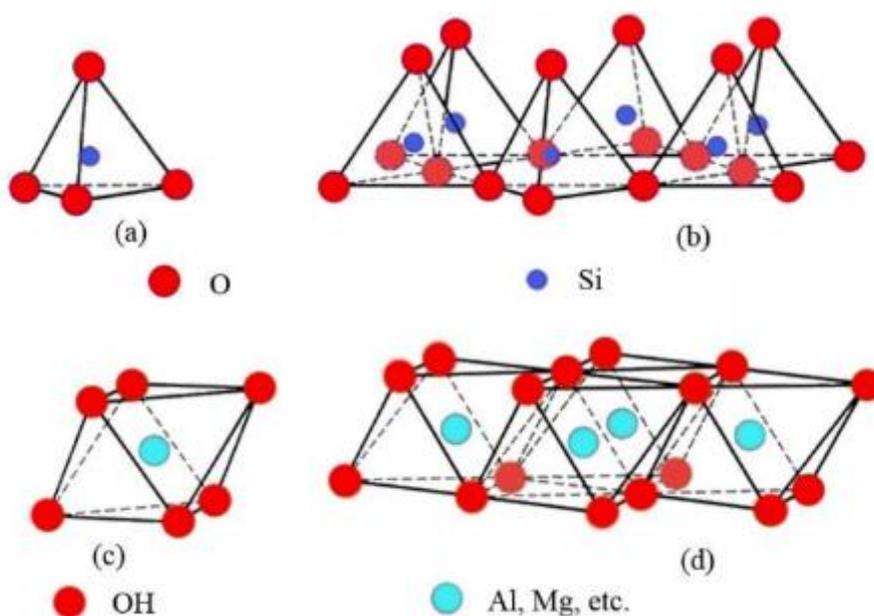


Figura 1. 4: Estructura molecular arcillas

Fuente: Eclética Química Journal - Unesp 2015

Debido a la flexibilidad estructural de sus láminas, las arcillas pueden adoptar una geometría apta para insertar una especie llamada huésped (átomos, moléculas o iones). Dentro de esta estructura los espacios interlaminares pueden ser modificados por cierto

tipo de especies anfífilas como son los surfactantes. La intercalación de un huésped en sistemas sólidos laminares permite aplicaciones como absorbentes de contaminantes en el tratamiento de agua, sensores químicos y membranas artificiales (M. Moreno, 2006)

Como consecuencia de estos factores, las arcillas presentan un valor elevado del área superficial entre 80 a 300 m² /g (Suárez., 2001)

El proceso de activación se realiza con la arcilla purificada e incluye algunos procesos físicos y químicos que tienen por objeto mejorar o potenciar algunas de sus propiedades para determinadas aplicaciones industriales (M. Alcalá de Jesús, 2009). La arcilla se puede activar mediante una activación ácida o una activación sódica. La activación ácida se realiza con un ácido mineral que puede ser ácido clorhídrico o ácido sulfúrico, pero se debe tener en cuenta que una activación excesiva puede provocar pérdida de porosidad y fuerza ácida en la arcilla (B. Makhoukhi, 2009)

Esta sal puede ser carbonato de sodio o cloruro de sodio. La activación sódica es mucho más sencilla y efectiva porque al intercambiar el catión divalente calcio presente en la arcilla por el catión monovalente sodio, mejora la estabilidad y la dispersión de la arcilla en el agua (M. Galimberti, 2011). Además, debido a que el sodio es un catión de menor tamaño atómico, la superficie específica de la arcilla aumentará al igual que su capacidad de intercambio catiónico, favoreciendo de esta manera el contacto entre la arcilla y el compuesto que se desea remover.

La capacidad de intercambio catiónico (CEC, por sus siglas en inglés) es una medida de la cantidad de sitios cargados negativamente en la superficie de la arcilla que pueden captar o retener iones cargados positivamente (D. Ross, 1995). Las arcillas al ser modificadas químicamente, con una sal sódica o una sal de alquilamonio, aumentan su CEC significativamente y pueden tener una mayor capacidad de adsorción de ciertos compuestos.

La remoción de los metales pesados de aguas sintéticas se da por el proceso de adsorción. Este proceso se considera como un fenómeno superficial que permite separar una sustancia que se encuentra en una fase fluida para se acumule sobre la superficie de un sólido. Los procesos de adsorción pueden ser de clasificados en tres tipos de acuerdo con la atracción entre el soluto y el adsorbente en: físico, químico y

por intercambio iónico.

La adsorción física se debe a las fuerzas de Van Der Waals entre los iones del soluto y la superficie del sólido, en este caso la sustancia adsorbida no se encuentra fija a la superficie del sólido por lo que se mueve libremente dentro de la interface. La adsorción química se debe a la interacción química entre la sustancia adsorbida y el adsorbente, formando enlaces fuertes localizados en los centros activos del adsorbente. La adsorción por intercambio iónico o adsorción por intercambio se da debido a que los iones de la sustancia adsorbida se acumulan o se concentran en la superficie del adsorbente debido a la atracción electroestática que muestran los lugares cargados de la superficie. Generalmente, la mayoría de los procesos de adsorción son una combinación de los tres tipos y no es sencillo distinguir o diferenciar entre la adsorción física y química (M Mestanza, 2012).

Por sus superficies internas accesibles y expandibles, los filosilicatos, presentan muy buenas propiedades adsorbentes para diversos contaminantes tanto orgánicos (Lagaly G. , 1994) como inorgánicos (Schmitt, 2002). Poseen una estructura laminar con carga negativa permanente, compensada por cationes interlaminares que otorgan una variedad de sitios de adsorción, tanto en las superficies externas como en el espacio interlaminar (Lagaly G. , 2001).

Cationes de cambio hidratados en la interlámina y en los bordes del mineral. Los sitios donde se localiza la carga, procedente de las sustituciones isomórficas, están compensados por cationes de cambio que se asocian a moléculas de agua y tienen un fuerte carácter hidrofílico (Mortland, 1970)

Grupos silanoles y aluminos de los bordes de ruptura. Originados por la ruptura de los enlaces Si-O-Si y Al-O-Si (Cerezo P., 2003), son sitios de carga variable dependiendo del pH del medio.

Grupos siloxano laminares de los planos basales. Estas zonas de la superficie de los planos basales externos o interlaminares comprendidos entre sitios cargados tienen carácter hidrófobo. (Jaynes W. &., 1991)

Tipo	Grupo (Xn)	Subgrupo	Algunas especies minerales: Fórmula Ideal
1;1	Caolinitas-serpentininas x- 0	Caolinitas	Diquita: $Al_2Si_2O_5(OH)_4$
			Halosita: $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 2H_2O$
			Metahaloisita: $Al_2Si_2O_5(OH)_4$
			Caolinita: $Al_2Si_2O_5(OH)_4$
			Nacrita: $Al_2Si_2O_5(OH)_4$
		Serpentininas	Anauxita: $Al_2Si_3O_7(OH)_4$
			Crisotilo: $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
			Antigorita: $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
			Amesita: $Mg_2Al(SiAl)O_5(OH)_4$
			Bertierina: $(Fe^{II}, Fe^{III}, Al, Mg)_{2-3}(SiAl)_2O_5(OH)_4$
2;1	Pirofilita-talco x-0	Pirofilita	Pirofilita: $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$
			Ferripirofilita: $Fe^{III}_2Si_4O_{10}(OH)_2$
		Talco	Talco: $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
			Minnesotaita: $(Fe^{II}, Mg)_3Si_4O_{10}(OH)_2$
			Montmorillonita: $0.33M^+ \cdot (Al_{1.67}Mg_{0.33})Si_4O_{10}(OH)_2$
	Esmecitas x-0,2_0,6	Dioctaédricas (montmorillonitas)	Beidelita: $0.33M^+ \cdot Al_2(Si_{3.67}Mg_{0.33})O_{10}(OH)_2$
			Nontronita: $0.33M^+ \cdot Fe^{III}_2(Si_{3.67}Mg_{0.33})O_{10}(OH)_2$
		Trioctaédricas (saponitas)	Volkonskoita: $0.33M^+ \cdot (Fe^{III}, Cr^{III}, Mg)_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$
			Saponita: $0.33M^+ \cdot (Mg, Fe^{II})_3(Si_{3.67}Al_{0.33})O_{10}(OH)_2$
			Sauconita: $0.33M^+ \cdot Zn_3(Si_{3.67}Al_{0.33})O_{10}(OH)_2$
2;1	Vermiculitas x- 0,6_0,9	Dioctaédricas	Hectorita: $0.33M^+ \cdot (Mg, Li)_3Si_4O_{10}(OH)_2$
			Vermiculita dioctaédrica: $0.67M^+ \cdot (Al, Fe^{III}, etc)_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$
		Trioctaédricas	Vermiculita: $0.67M^+ \cdot (Mg, Fe^{II}, etc.)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$
			Moscovita: $(K, Na)(Fe^{III}, Al, Mg)_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$
			Paragonita: $NaAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
	Micas-ilitas x-1	Dioctaédricas	Ilita: $(K, H_3O)(Al, Mg, Fe^{II})_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$
			Glauconita: $(K, Na)(Fe^{III}, Al, Mg)_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$
		Trioctaédricas	Flogopita: $KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH, F)_2$
			Biotita: $K(Mg, Fe^{II})_3(Si_3Al)O_{10}(OH, F)_2$
			Lepidolita: $K(Li, Al)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH, F)_2$
2;1;1	Micas frágiles x-2	Dioctaédricas	Margarita: $CaAl_2(Si_2Al_2)O_{10}(OH)_2$
			Clintonita: $Ca(Mg, Al)_3(SiAl_3)O_{10}(OH)_2$
		Trioctaédricas	Sudoita: $Mg_2(Al, Fe^{III})_3Si_3AlO_{10}(OH)_8$
			Clinocloro: $(Mg, Fe^{II})_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$
			Nimita: $(Ni, Mg, Fe^{II})_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$
	Cloritas x variable	Dioctaédricas	Paligorskita: $(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_4 \cdot H_2O$
			Sepiolita: $Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$
		Trioctaédricas	
2;1 Porosos	Hormitas x variable	Mixoditrioctaédricas	
		Trioctaédricas	

Tabla 1.4: Tipos de arcillas según su estructura molecular

Fuente: (Durán, 2017)

Los principales mecanismos de adsorción de metales pesados en los minerales dependen del pH, con bajos valores de pH el proceso de intercambio catiónico predomina en la adsorción (Siantar, 1994), mientras que los altos valores de pH, la retención metálica puede darse preferentemente en los sitios creados por el desplazamiento de protones de hidroxilos superficiales, responsables de la complejación superficial (Stadler, 1993).

Por sus características de carga, las esmectitas son buenos adsorbentes de cationes y moléculas polares inorgánicas y orgánicas. Sin embargo, debido a la fuerte hidratación de los cationes intercambiables inorgánicos, que confieren propiedades hidrofílicas a su superficie, su capacidad de adsorción de compuestos orgánicos hidrófobos se ve considerablemente reducida. (Jaynes W. &, 1996)

El desplazamiento de estos cationes intercambiables interlaminares por cationes orgánicos mediante reacciones de intercambio iónico consigue modificar la naturaleza de la superficie de estos minerales de la arcilla, de hidrofílica a hidrofóbica. Por lo tanto, la modificación de estos minerales de la arcilla sería un buen método para la mejora de las propiedades de adsorción que presentan y aumentando, por tanto, su aplicación como un adsorbente muy eficiente.

Las arcillas orgánicas u organoarcillas son filosilicatos de tipo expandibles modificados mediante la sustitución de sus cationes interlaminares inorgánicos por cationes orgánicos. En general, la entrada de cationes orgánicos en el espacio interlaminar de las esmectitas puede seguir mecanismos de naturaleza diferente, siendo los principales las reacciones de intercambio catiónico y la adsorción física.

Se ha examinado la reacción de las arcillas con moléculas que contengan grupos funcionales quelatantes de metales pesados, consiguiendo aumentar así la adsorción y la selectividad de las arcillas para metales pesados (Sheng, 1999). De este modo, (Celis R., 2000) estudiaron la introducción de ligandos orgánicos en la interlámina de montmorillonitas con grupos funcionales -SH (cationes 2-mercaptoetilamonio) que actúan como quelatantes de metales, obteniendo así organoarcillas con mejor capacidad que las iniciales sin modificar para la adsorción, a bajas concentraciones, de Hg^{2+} y Pb^{2+} mientras que a altas concentraciones de Pb^{2+} y Zn^{2+} fueron menos efectivas. Además, para mejorar la selectividad de la organoarcilla por el catión

metálico, es muy importante llevar a cabo una selección adecuada del ligando orgánico, de forma que posea los grupos complejantes con mayor afinidad por el catión metálico a enlazar, como pueden ser, tioles, aminas, o éteres corona (Bradshaw, 1997)

1.4.2 Superficie específica

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g . Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad. A continuación se muestran algunos ejemplos de superficies específicas de arcillas: (Ramos M. J., 2010)

Tipo de arcilla	m^2/g
Caolinita	5-20
Illita	100-200
Montmorillonita	300-500
Vermiculita	700-800

Tabla 1.5: Superficie específica

Fuente: (Ramos M. J., 2010)

1.4.3 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Son capaces de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico (CEC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80 % de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos de origen varían en función del pH y de la actividad iónica. Corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20 % de la carga total de la lámina (Ramos M. J., 2010)

Tipo de arcilla	CIC (meq/100g)
Caolinita	3-5
Halloisita	10-40
Illita	10-50
Clorita	10-50
Vermiculita	100-200
Montmorillonita:	80-200
Sepiolita-paligorskita:	20-35

Tabla 1.6: CIC arcillas

Fuente: (Ramos,2010)

1.5 Zeolitas

El término zeolita viene del griego zéo y líthos que quiere decir piedra que hierve o piedra efervescente. En 1756, con el descubrimiento de la estilbita por el mineralogista sueco Barón Alex Frederick Consted, las zeolitas fueron reconocidas por la primera vez. Las zeolitas son aluminosilicatos de metales alcalinos o alcalino-terrosos predominantemente de sodio y calcio (Clarke, 1980)

Las zeolitas naturales presentan como características relevantes, una estructura microporosa que le confiere propiedades adsorbentes y una gran capacidad de intercambio catiónico debido a un desequilibrio de cargas que es función de la relación Si y Al.

Las zeolitas naturales son eficientes en la remoción de metales pesados (Pb, Cu, Ni, As, Cd Cd, Hg, Zn) en efluentes minero metalúrgicos, son aluminosilicatos de metales alcalinos o alcalino-terrosos predominantemente de sodio y calcio.

- Las zeolitas naturales son producidas y beneficiadas a bajo costo
- Sirven también para la adsorción de vapores de mercurio en hornos de copelación quemadores de amalgama. (Curi, 2006)

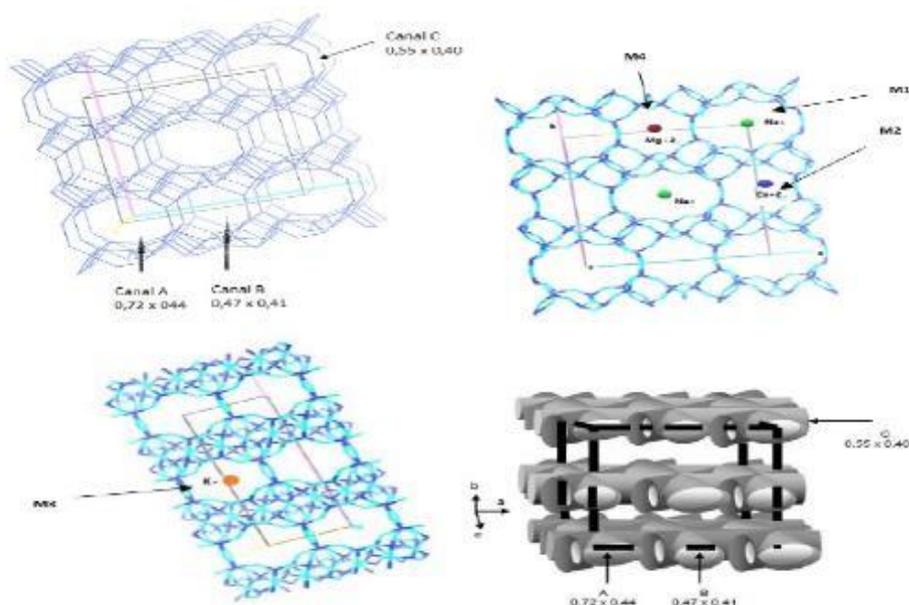


Figura 1. 5: Estructura cristalográfica de la zeolita

Fuente: Revista Boliviana de Química, vol. 36, núm. 3, 2019

De acuerdo con estudios realizados sobre la capacidad que tiene la zeolita de absorber el amoníaco (NH_3) de mezclas gaseosas y el catión NH_4^+ de soluciones sólidas (Tsitsishvili G. V.; Kirov G. N.; Filizova L. D., 1992) en el trabajo se estudia la posibilidad de intercambiar parte de los cationes móviles o intercambiables de la Clinoptilolita por cationes NH_4^+ . Esto posibilita que, poniendo esta zeolita modificada, de esta manera en un medio como tierras de cultivo con un alto contenido de cationes Na^+ , ocurra el mecanismo inverso, es decir, que los cationes Na^+ , de la

Zeolitas	Formula Química
Laumontita	$\text{Ca Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Clinoptilolita	$(\text{Na},\text{K},\text{Ca})_{2-3}\text{Al}_3(\text{Al},\text{Si})_2\text{Si}_{13}\text{O}_{36} \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$
Stilbita	$\text{Na Ca}_2\text{Al}_5\text{Si}_{13}\text{O}_{36} \cdot 14\text{H}_2\text{O}$
Phillipsita	$(\text{K},\text{Na},\text{Ca})_{1-2}(\text{Si},\text{Al})_8 \cdot \text{O}_{16} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Erionita	$(\text{K}_2,\text{Ca},\text{Na}_2)_2\text{Al}_4\text{Si}_{14}\text{O}_{36} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$
Offretita	$(\text{K}_2,\text{Ca})_5\text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72} \cdot 30\text{H}_2\text{O}$
Faujazita	$(\text{Na}_2\text{Ca})\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Chabazita	$\text{Ca Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Natrolita	$\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Thomsonita	$\text{Na Ca}_2\text{Al}_5\text{Si}_5\text{O}_{20} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Mordenita	$(\text{Ca},\text{Na}_2,\text{K}_2)\text{Al}_2\text{Si}_{10}\text{O}_{24} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Epistilbita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_6\text{O}_{16} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Analcima	$\text{Na},\text{AlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Heulandita	$(\text{Na},\text{Ca})_{2-3}\text{Al}_3(\text{Al},\text{Si})_2\text{Si}_{13}\text{O}_{36} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$

Tabla 1.7: Tipos de zeolita

Fuente: (Curi, 2006)

tierra puedan en un grado apreciable ser intercambiados por los cationes amonio y de esta forma disminuir el potencial químico de dicho catión en los terrenos mejorando la absorción de los nutrientes a la planta (Lemic J. y Col., 2006). Como cita (Hernández & Riera, 2014) en su artículo sobre un aumento en la CIC de la zeolita modificada con una solución de NH_4Cl .

Las zeolitas naturales se emplean en la remoción de metales pesados en efluentes minero metalúrgicos, en el tratamiento de drenaje ácido de mina y de roca, para la adsorción de vapores de mercurio en hornos de copela quemadores de amalgamas y también en el tratamiento de suelos contaminados por radiación y de licores radioactivos provenientes de centrales nucleares. Según (Babel, 2003) mas de 100 artículos técnicos tratan del uso de los adsorbentes de iones metálicos de bajo costo, siendo que las zeolitas están entre las más eficientes.

1.5.1 Propiedades de las zeolitas

Las propiedades más relevantes de las zeolitas naturales son: porosidad, adsorción e intercambio iónico.

1.5.1.1 Porosidad

Las zeolitas son formadas por canales y cavidades regulares y uniformes de dimensiones moleculares (3 a 13 nm) que son medidas similares a los diámetros cinéticos de una gran cantidad de moléculas. Este tipo de estructura microporosa hace que las zeolitas presenten una superficie interna extremadamente grande en relación a su superficie externa. La IUPAC (The International Union of Pure and Applied Chemistry) reconoce tres tipos de poros atendiendo a su tamaño (Sing, 1985). Si son mayores de 50 nm se conocen como macroporos, si su diámetro está comprendido entre 2 y 50 nm se trata de mesoporos y si son menores de 2 nm, como es el caso de los poros de las zeolitas, son microporos.

Cuando la distancia entre dos superficies es suficientemente corta, los potenciales de adsorción se suman, de forma que una molécula situada en el interior del poro se ve atraída por toda la superficie del poro aumentando la fuerza con la que se ve atraída. Es decir, a medida que disminuye el tamaño del poro más profundo se hace el pozo de potencial. En el caso de que el poro sea suficientemente ancho las moléculas se irán adsorbiendo formando una monocapa a una distancia determinada de la superficie

(distancia de adsorción), y a medida que aumenta la cantidad adsorbida el adsorbato se ordena en capas sucesivas (llenado en multicapas) (Gregg, 1967).

1.5.1.2 Adsorción

La superficie de los sólidos es una región singular, que es responsable o al menos condiciona muchas de sus propiedades. Los átomos que se encuentran en ella no tienen las fuerzas de cohesión compensadas, como ocurre en los átomos situados en el seno del sólido que es, en definitiva, responsable de las propiedades de adsorción de los sólidos. A distancias suficientemente grandes, no existe una interacción apreciable entre una molécula acercándose a una superficie, por lo tanto, la energía de este sistema es próxima a cero. A medida que la molécula se acerca a la superficie la energía del sistema comienza a disminuir debido a que las fuerzas de cohesión de los átomos de la superficie empiezan a verse compensadas. En otras palabras, el potencial de adsorción origina una fuerza atractiva que provoca el acercamiento de la molécula a la superficie. Cuando la distancia entre la superficie y la molécula libre comienza a disminuir, las fuerzas de repulsión (debidas a la proximidad de las capas de electrones de los átomos de la superficie con los átomos de la molécula libre) comienzan a ser importantes. Por lo tanto, existe una distancia para la cual la energía del sistema es mínima. La alta eficiencia de adsorción de las zeolitas está relacionada a la gran superficie interna que esta posee. Cuando el tamaño del poro disminuye se produce un incremento significativo del potencial de adsorción, ocasionado por el solapamiento de los potenciales de las paredes del poro. Así, para un mismo adsorbato, la interacción con las paredes del poro es mayor cuanto menor es el tamaño del poro, y por tanto, mejor el confinamiento de la molécula adsorbida (García, 2002).

1.5.1.3 Intercambio iónico (I.I)

La propiedad de Intercambio Iónico (I.I.) se ha observado en minerales silicatos cristalinos como arcillas, feldespatos y zeolitas. Se considera una propiedad intrínseca de estos minerales pues es el producto de la sustitución isomórfica de los átomos de silicio de su estructura cristalina por otros átomos. En el caso de las zeolitas esta sustitución ocurre por átomos tetravalentes de aluminio lo que produce una carga neta negativa en la estructura que se compensa por cationes fuera de ella. Estos cationes son intercambiables, de ahí la propiedad intrínseca de I.I. que también es una

manifestación de su naturaleza de estructura cristalina microporosa, pues las dimensiones de sus cavidades y de los cationes que se intercambian determinan el curso del proceso.

El comportamiento de I.I. en las zeolitas depende de varios factores que determinan una mayor selectividad en las zeolitas a determinados cationes: -naturaleza de los cationes en solución, temperatura, concentración de los cationes en solución, aniones asociados con los cationes en solución, solvente – agua, solvente orgánico, estructura de la zeolita – topología de la red y densidad de la carga de red.

La capacidad de intercambio iónico (C.I.I.) de una zeolita 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. Esta capacidad está directamente relacionada con el Al presente en la red zeolítica y depende directamente de su composición química (Breck, 1974). Una alta capacidad de intercambio iónico corresponde a zeolitas con baja relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Clarke, 1980). La C.I.I. teórica máxima, número de equivalentes intercambiables por masa de la celda unitaria, no siempre puede ser alcanzada debido a la existencia de sitios de intercambio inaccesibles.

1.5.1.4 Tratamiento de efluentes mineros

Desde el punto de vista del control ambiental mediante la eliminación de contaminantes la gran mayoría de los autores coinciden en la superioridad de las zeolitas naturales atendiendo a: -bajo costo de extracción, disponibilidad de grandes volúmenes, excelente estabilidad a los procesos químicos y térmicos que permiten su reactivación y utilización en varios ciclos. Según (Englert, 2005) las investigaciones con zeolitas naturales y sus aplicaciones en los trabajos relativos al medio ambiente están aumentando debido a sus propiedades y significativa incidencia. Como menciona Melamed (Melamed, 2006) la atención creciente le ha sido dada, por el sector industrial, para la remoción de metales pesados presentes en efluentes líquidos procurando atender la legislación ambiental. En los efluentes de la industria minera los tratamientos normalmente recomendados para remover metales pesados, incluyen procesos como precipitación, evaporación, electrodiálisis, absorción en bio-carbón, extracción por solventes e intercambio iónico con resinas sintéticas. Los tratamientos con zeolitas tienen una gran ventaja, sobre los mencionados

anteriormente, desde el punto de vista económico ya que las zeolitas presentan un bajo costo. Los usos de las zeolitas naturales que se describen a continuación están enfocados principalmente en el tratamiento de efluentes mineros, metalúrgicos y de la contaminación por mercurio producida por actividades mineras informales.

1.5.1.5 Tratamiento de drenaje ácido de mina

Según (Vaca, 2001) describen los tests realizados para la remoción de metales pesados a través de una zeolita natural mejicana compuesta por clinoptilolita. Estudios a escala de laboratorio (Luz, 1994) (Rodríguez, 2000) (M., 1997); indican la remoción de metales pesados (Cu, Zn, Cd, Ni, Mn, Fe), por combinación de procesos de precipitación-neutralización con I.I. con clinoptilolita natural sódica, de desagües ácidos de minas. Los resultados demuestran como la eliminación de los metales se verifica fundamentalmente por intercambio (I.I) de los iones Na^+ . En la disolución se incrementa considerablemente el contenido de Na^+ y ligeramente el de K^+ , como prueba el intercambio de estos con los cationes de los metales pesados. El ión K^+ se comporta de forma reversible en el intercambio. A modo general, la remoción de estos metales pesados es lenta pero efectiva, presentándose los mejores resultados para el Cu, Zn y Cd con un 99,91% y para el Mn 60 %. Lazaridis et al., (Lazaridis, 2004) estudiaron la recuperación de iones de cobre de efluentes reales y simulados provenientes de una mina y de una unidad de tratamiento de minerales a partir de varias técnicas de separación incluyendo el uso de zeolitas como agente adsorbente y flotación.

El estudio constató que la remoción de cobre es siempre mayor en soluciones simuladas que en efluentes reales. Según los autores, debido a la presencia de contaminantes como los compuestos orgánicos. (Dabrowsky, 2004) realizaron un estudio interesante sobre la remoción selectiva de iones de metales pesados en efluentes industriales por intercambio iónico. Según los autores la metodología es, en general, tecnológicamente simple, y posibilita la remoción eficiente de hasta trazos de impurezas en las soluciones acuosas. El estudio incluyó la remoción de los iones Pb^{+2} , Hg^{+2} , Cd^{+3} , $\text{Ni}^{+2, +4, +5}$, $\text{Cr}^{+4, +5}$, Cu^{+2} y Zn^{+2} de varios efluentes industriales. Según (Ören, 2006) el zinc es uno de los contaminantes industriales más comunes en los efluentes industriales y también uno de los más difíciles de remover. Ellos investigaron las características de adsorción del zinc por dos zeolitas naturales encontradas en la

región de Gordes y Bigadic, en el oeste de Turquía.

(Erdem.E., 2004) estudiaron el comportamiento de la adsorción de la zeolita clinoptilolita con relación a los iones Co^{+2} , Cu^{+2} , Zn^{+2} y Mn^{+2} . Fue constatado que el fenómeno de adsorción depende de la densidad de carga y del diámetro del ión hidratado. Según los estudios de equilibrio realizados la secuencia de selectividad de la referida zeolita con relación a los iones citados puede ser representada así: $\text{Co}^{+2} > \text{Cu}^{+2} > \text{Zn}^{+2} > \text{Mn}^{+2}$.

1.5.1.6 Tratamiento de efluentes metalúrgicos

(Chabalina, 1991) estudió en disoluciones sintéticas la remoción, por I.I., de cationes de metales pesados (Ni^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{3+} , Zn^{2+}) típicamente presentes en residuos de talleres galvánicos, usando zeolitas de diferentes yacimientos cubanos (Piojillo, San Cayetano, Tasajera y San Andrés). Los resultados permitieron establecer diferencias en la selectividad y capacidad de intercambio de los materiales zeolíticos naturales sin modificación de estos. La mayor capacidad de intercambio de iones Ni y Zn la mostró la zeolita clinoptilolita clásica del yacimiento de San Cayetano; para el Cd y Cu la clinoptilolita-heulandita cálcica del yacimiento de Piojillo, mientras que para el Cr la clinoptilolita sódica del yacimiento de San Andrés.

En contraposición al carácter reversible del intercambio observado por una gran gama de metales pesados, los estudios realizados por (Pansini, 1991) y (Louzidou, 1992) sobre la remoción de Cr^{3+} , por I.I., de residuos líquidos usando diferentes zeolitas naturales (phillipsita, chabazita, clinoptilolita, mordenita y ferrierita), muestran que el intercambio de este metal es marcadamente irreversible. Según Pancini (1997) una vez retenido sólo logran revertir un 5-10% del Cromo. En Reno Research Center y en el U. S. Bureaux of Mines se probaron 22 zeolitas, entre las cuales se incluían clinoptilolita, mordenita, chabazita, eroinita y phillipsita, en la retención de una serie de metales (Zamzow, 1990). Se encontró que la selectividad, en el caso de clinoptilolita, era $\text{Pb} > \text{Cd} > \text{Cs}$ y $\text{Cs} > \text{Cu (II)} > \text{Cr (III)} > \text{Ni (II)} > \text{Hg (II)}$. Para la retención de plomo, el orden de eficiencia de las diferentes zeolitas fue: phillipsita > chabazita > eroinita > clinoptilolita > mordenita, lo cual se correlaciona bien con la relación Si/Al de ellas. En iguales condiciones de operación, a la menor razón Si/Al corresponde una mayor capacidad de la zeolita para intercambio catiónico.

(Cabrera, 2005) Investigaron las características de adsorción de un material natural abundante en Cuba conteniendo clinoptilolita y mordenita en relación a la remoción de Cu^{+2} , Ni^{+2} y Zn^{+2} de efluentes metalúrgicos. Se realizaron estudios para evaluar la cinética del proceso y determinar las constantes de equilibrio del proceso de adsorción a diferentes valores de pH y diferentes concentraciones de los cationes y de las zeolitas constatándose que el referido material natural tiene un alto potencial para la retención de metales pesados con la selectividad para el $\text{Cu}^{+2} > \text{Ni}^{+2} > \text{Zn}^{+2}$. Los experimentos constataron que la habilidad de retención de metal es muy dependiente del pH y en menor extensión de la relación metal/zeolita. También en Jordânia, (Ibrahim, 2002) investigaron el uso de un residuo natural conteniendo chabazita y phillipsita para el tratamiento de efluentes metalúrgicos. Según los autores el alto contenido de zeolitas del material, su capacidad de intercambio iónico y resistencia a la fricción capacitan el material para uso como un intercambiador iónico. El material se mostró un éxito en la remoción de una gran variedad de cationes metálicos incluso en presencia de altas concentraciones de iones competidores tales como Na^+ , Ca^{+2} y K^+ .

1.5.1.7 Tratamiento de contaminación por mercurio

Las actividades mineras informales utilizan el mercurio para la concentración de oro. Parte de este mercurio, lanzado al medio ambiente, está contaminando los suelos, los ríos y siendo absorbido por los peces y seres humanos con gran impacto sobre el medio ambiente y grandes riesgos para la salud pública. Los iones metálicos presentan baja movilidad en los suelos gracias a mecanismos de intercambio catiónico, absorción a los óxidos/ hidróxidos, precipitación, etc. Sin embargo, debido al carácter reversible de las reacciones químicas envueltas, alteraciones en las condiciones físico-químicas del sistema suelo /agua pueden interferir en la fase sólida (Borma, 1996) Esto contribuye a la gran dispersión de la contaminación del mercurio tanto en el agua como en el suelo.

En Concepción (Chile) se han hecho estudios (Arraigada, 2001) de retención de mercurio usando zeolitas naturales cubanas (70% clinoptilolita), mexicanas (80% de eroinita) y chilenas (mezcla de mordenita y clinoptilolita). Se estudió en condiciones normalizadas la velocidad y capacidad de retención de Hg(II) en las zeolitas indicadas y se determinó la influencia de algunos parámetros del intercambio: temperatura, concentración, tamaño de la partícula y pH del medio. La clinoptilolita cubana fue la

que alcanzó mejor resultado. (Chojnacki, 2004) discuten la aplicación de zeolitas naturales del grupo de la clinoptilolita para la remoción del mercurio de los efluentes industriales a escala de laboratorio e industrial. Los experimentos incluyeron estudios del mecanismo y del equilibrio de adsorción. Se constató la efectividad del proceso y también que el mecanismo dominante de la adsorción con zeolitas es el intercambio iónico. La capacidad máxima de adsorción fue evaluada en 1.21 meq Hg^{+2} / g de adsorbente.

(Melamed, 2006) realizaron testes con attapulgitas, zeolitas, caolín, vermiculitas y bentonitas. Los resultados demostraron la relativamente alta eficiencia de las zeolitas en la remoción del mercurio. Según el estudio las zeolitas son capaces de remover especies de mercurio de efluentes con concentraciones de hasta 1000 ppm, correspondiendo a una capacidad de adsorción de 10.000 mg Hg/ kg.

1.5.1.8 Otros estudios

(Englert, 2005) describen la caracterización de una zeolita natural chilena y los resultados de su uso como adsorbente del radical amonio presente en soluciones acuosas. La muestra estaba compuesta principalmente por clinoptilolita y mordenita. La remoción del radical amonio por intercambio iónico a pH neutro se procesó a tasas de 0,68 meq NH_4^+ g⁻¹. En los estudios de (Zamboulis, 2004) una zeolita sintética ultrafina fue inicialmente aplicada como adsorbente para la remoción de los cationes cobre y zinc y también de los oxi-aniones cromo (VII). La flotación fue aplicada a continuación para la eficiente separación del adsorbente. (Dal Bosco, 2005) testaron la capacidad de cambio iónico de una zeolita natural brasileña denominada scolecita. Fueron investigados los procesos de adsorción para Cr^{+3} , Ni^{+2} , Cd^{+2} y Mn^{+2} en un efluente acuoso sintético. (Matis, 2004) investigaron la aplicación de la flotación para la separación de zeólitas cargadas con zinc. (Turan, 2005) investigaron la eficiencia de remoción del plomo por las zeolitas clinoptilolita y sepiolita en soluciones acuosas y en columnas de lecho fijo.

Según (Faghihian, 2005) las superficies de las zeolitas no modificadas no tienen afinidad por aniones, por estar negativamente cargadas. Por ello, la adsorción de aniones por las zeolitas no ha sido muy estudiada. En este estudio, sin embargo, fue constatado que después de la modificación de la superficie de la clinoptilolita por la

adición de cationes ésta es capaz de adsorber una cantidad considerable del anión cromato divalente (Cr^{3-2}). (Louzidou, 1992) demostraron que los cationes de cromo trivalente pueden ser retenidos por zeolitas naturales. Los experimentos con una zeolita natural (clinoptilolita) que se encuentra en gran cantidad en Grecia, mostraron que altas concentraciones de los iones cromo son removidos de soluciones acuosas en poco tiempo. Otros estudios relativos a las especificidades del proceso, tales como, aquellos relativos a la cinética y al equilibrio del proceso de intercambio iónico para los iones Pb^{+2} , Cr^{+3} , Fe^{+3} y Cu^{+2} , de una clinoptilolita natural (Inglezakis, 2002) o la influencia del condicionamiento químico en la capacidad de intercambio iónico y en la cinética en relación a la clinoptilolita (Athanasiadis, 2005) pueden ser encontrados en la literatura técnica referente al asunto. (Curi, 2006)

(Mumpton, 1999) (Como se citó en Hernández, 2014) La mayoría de los trabajos con zeolitas que se hacen en la actualidad para uso agrícola manejan tamaños de partícula mucho menores a los empleados en el presente trabajo, sin embargo, muchos de estos trabajos no consideran importante el hecho que es mejor, desde el punto de vista práctico, sacrificar superficie específica del material, como en este caso trabajando con granulometrías entre 1-3 mm, pero ganando en mejor transferencia gaseosa en las inmediaciones de la rizósfera, lo cual se facilita empleando granulometrías mayores a las comúnmente empleadas en esos experimentos. Este fenómeno se agudiza en las tierras arcillo-arenosas de Sonora donde con el humedecimiento viene la compactación y con ello, en muchos casos la inhabilitación de las raíces de la planta y su muerte. Es por ello que se prefiere sacrificar en buena medida la eficiencia del intercambio iónico por un aumento del intercambio gaseoso.

1.6 Adsorción

La adsorción es capaz de eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos del agua, es un proceso dinámico por el cual las moléculas de un compuesto llamado adsorbato, que se encuentra en una fase fluida (líquida o gaseosa), se adhiere por distintos tipos de fuerzas o mecanismos de interacción a la superficie de un sólido, llamado adsorbente, donde quedan retenidos. Existe diferentes métodos para la adsorción como el uso de resinas de intercambio iónico, bio-carbón activado, aplicación de materiales biológicos (bioadsorción), etc. (Durán, 2017).

La bioadsorción es un proceso físico-químico que contienen fenómenos de adsorción de moléculas y iones. Es un método poco convencional que tiene como objetivo la remoción de metales en aguas residuales provenientes del sector industrial, usando como adsorbentes materiales de origen biológico (vivas o muertas) como, por ejemplo: algas, hongos, biobio-carbón, cascaras de frutas, etc (Tejada, 2015).

La absorción, por otra parte, es cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad.

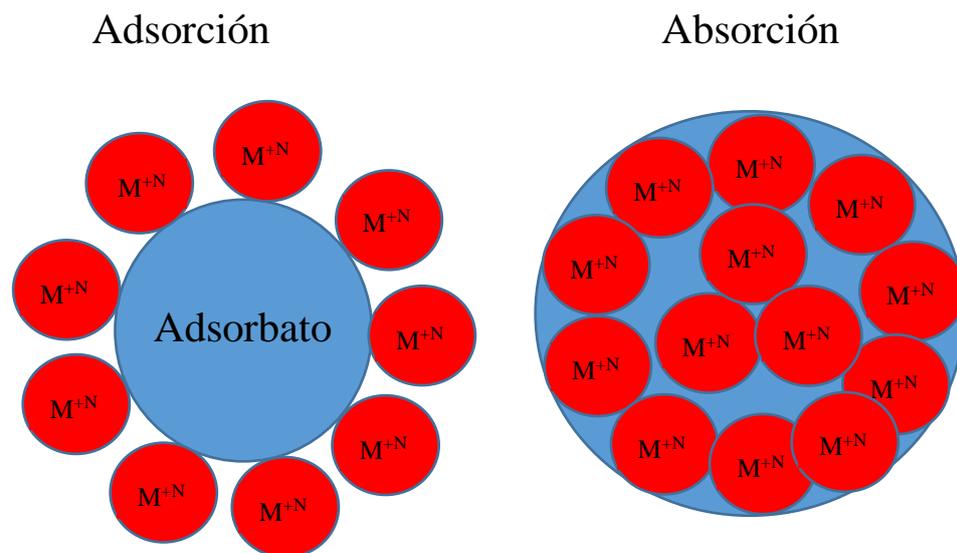


Figura 1. 6: Adsorción y absorción

1.7 Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la propiedad de un sólido para adsorber cationes de la fase líquida, intercambiándolos por una cantidad equivalente de otros cationes. En el sistema sólido-líquido se establece un equilibrio dinámico entre los cationes de la solución y los adsorbidos en los puntos activos de la superficie. (López, 2003)

El número total de cationes que un suelo puede retener; esto es, su carga negativa total, corresponde a la capacidad de intercambio catiónico del suelo, CIC.

CIC es medida en mili equivalentes por 100 gramos de suelo (meq/100g).

El equivalente gramo de una molécula o átomo se calcula así:

$$\text{Peso Equivalente} = \frac{\text{peso molecular o atómico (g)}}{\text{valencia o cargas por fórmula}}$$

Este peso equivalente de cada elemento o molécula corresponde a aquél que es desplazado por un gramo de hidrogeniones (1 gramo de H^+). Así: Calcio (Ca^{++}) 20 gramos Magnesio (Mg^{++}) 12,15 Potasio (K^+) 39,1 Amonio (NH_4^+) 18

Suelos con alta CIC pueden retener altos niveles de acidez $CIC > 10$ Son suelos orgánicos o arcillosos que son altamente tamponados y requieren altas cantidades de cal para aumentar el pH.

Suelos con baja CIC no retienen acidez. $CIC < 5$ Son suelos arenosos y requieren menor cantidad de enmienda para corregir el pH.

Suelos con alta CIC pueden retener una mayor cantidad de nutrientes y por tanto la fertilización puede ser espaciada en el tiempo. $CIC > 10$ Son suelos orgánicos o arcillosos que tienen muchos sitios activos en el complejo y que “no dejan” perder los nutrientes con el agua lluvia.

Suelos con baja CIC no retienen nutrientes. $CIC < 5$ Son suelos arenosos y requieren de una mayor frecuencia de aplicación de nutrientes, para no perderlos por lixiviación. (Piedrahita, 2011)

1.8 Molienda y chancado

La molienda es una operación unitaria, que reduce el volumen promedio de las partículas de una muestra sólida. La reducción se lleva a cabo dividiendo o fraccionando la muestra por medios mecánicos hasta el tamaño deseado. Los métodos de reducción más empleados en las máquinas de molienda son compresión, impacto, frotamiento de cizalla y cortado (Valladares, 2008)

Como describió (Austin & Concha, 1994) la reducción de tamaño de sólidos se lleva a cabo por distintos métodos y con fines diferentes. Los grandes bloques se desintegran

hasta un tamaño manejable. La conminución del material aumenta la reactividad de los sólidos, permite la separación por métodos mecánicos de ingredientes no deseados.

Los productos obtenidos por molienda son más pequeños y de forma más regular que los surgidos de trituración. Generalmente se habla de molienda cuando se tratan partículas de tamaños inferiores a 1" (1" = 2.54 cm) siendo el grado de desintegración mayor al de trituración (Cabe, 1991)

1.9 Pellets

Los Pellets son masas pequeñas y redondeadas de cualquier substancia cilindroides o esferoides que pueden formarse por extrusión, por compresión o por adhesión. La extrusión es un proceso de densificación y conformación de materiales pulverulentos o fibrosos para obtener cilindros de alta densidad y baja humedad. Son muy utilizados por las industrias de alimentos animales, fertilizantes química, minería. (Riegelhaupt, 2014)

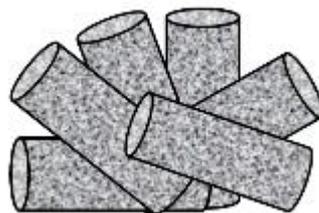


Figura 1. 7: Pellets

La densidad específica es una propiedad intensiva a diferencia de la humedad o el volumen que se consideran como extensivas, es decir dependen del tamaño de la muestra, es una característica propia de cada materia a procesar, cuanto más denso sea el material más resistencia a la compresión ofrece, obligando a aplicar más presión para conseguir los mismos grados de compactación.

En los pellets deben considerarse dos valores de la densidad: la densidad real y la densidad aparente.

La densidad real o específica es el cociente entre la masa real y el volumen real de los pellets.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

La densidad aparente es el cociente entre la masa aparente (que es igual a la masa real) y el volumen aparente (que es el volumen real más el volumen de los huecos entre los pellets). (Campos & Marcos, 2008)

Como el volumen aparente es mayor que el volumen real, la densidad aparente es menor que la densidad real.

1.9.1 Friabilidad

Un aspecto a tomar en cuenta es la friabilidad que se relaciona con la capacidad de los pellets para resistir los golpes y abrasión sin que se desmoronen durante el proceso de manufactura, empaque, transporte y uso por parte del consumidor.

La friabilidad es una variable muy importante en los pellets pues se están manipulando continuamente y chocando unos con otros. La friabilidad del pellet puede ser considerada en dos casos:

- La resistencia al golpeteo en el movimiento de pellets.
- La resistencia a desmenuzarse (friabilidad) cuando el pellet está en el hogar, horno o parrilla, también llamada friabilidad en la combustión.

Para evaluar la friabilidad de los pellets, se proponen dos métodos de ensayo:

- Método del golpe contra el suelo.
- Método del golpeteo entre sí.

1.9.1.1 Método del golpe contra el suelo

Este método está basado en la rotura de pellets por golpeteo contra el suelo, en esencia, consiste en dejar caer sobre el suelo cerámico, desde una altura de 100 cm, 100 pellets y contar el número de pellets que se rompen en 2, 3, 4, 5 o más trozos, y obtener a partir de esos resultados un índice de friabilidad FR1, este método es sencillo, para calcular el índice de friabilidad (FR) se utiliza la siguiente ecuación:

$$FR1 = \frac{NI}{NF} \quad (2)$$

Donde:

NF Es el número de pellets al final del ensayo.

NI Es el número de pellets al inicio del ensayo.

El valor del índice FR es siempre menor o igual a 1. A mayor valor de FR1 mayor será la friabilidad y, por tanto, menor la resistencia al golpeteo. (Marcos & Camps, 2002)

1.9.1.2 Método del golpeteo entre sí

Este método se basa en la rotura de pellets por golpeteo entre ellos, consiste en introducir en un recipiente de dimensiones estandarizadas pellets o briquetas enteros, contando el número de pellets o briquetas introducidos al inicio del ensayo (NI) y tenerlos vibrando un tiempo determinado en condiciones también estandarizadas dicho recipiente, pasado ese tiempo se cuenta el número de pellets finales (NF).

$$FR2 = \frac{NF}{NI} \quad (3)$$

Donde:

NF Es el número de pellets al final del ensayo.

NI Es el número de pellets al inicio del ensayo.

El valor del índice FR2 también es siempre menor o igual a 1. A mayor valor de FR2 mayor será la friabilidad y, por tanto, menor la resistencia al golpeteo. (Campos Michelena, 2008) (Marcos & Camps, 2002)

1.9.2 Tipos de pelletizadoras

1.9.2.1 Principio de prensado por compresión o contricción

La prensa de rodillos para fabricación de briquetas funciona bajo el principio de contricción utilizando un arreglo de rodillos solidarios a un eje; la alimentación de la prensa de rodillos se realiza por gravedad por medio de tolva en la parte superior o lateral de los rodillos; la clasificación del prensado por rodillos se realiza dependiendo

de la ubicación de los rodillos, los rodillos pueden ser ubicados simétricamente entre las chumaceras o fuera de estas en los extremos de los ejes.

La geometría de la briqueta fabricada con prensa briquetadora de rodillos depende de la muesca realizada sobre la superficie o cara de trabajo. Las prensas de rodillos se clasifican según la construcción en rodillos integrales o rodillos segmentados y paralelos o perpendiculares:



Figura 1. 8: Peletizadora industrial Kahl

Fuente: Ortizco maquinaria y equipos industriales

1.9.2.1.1 Rodillos integrales

Rodillos solidarios al eje provistos de protección contra la corrosión usando cinta de acero inoxidable o materiales resistentes al desgaste y abrasión como envolventes; la cual, está unida al rodillo mediante unión soldada a la cara de trabajo. Se emplean en la fabricación de briquetas de productos alimenticios y farmacéuticos.

1.9.2.1.2 Rodillos segmentados

Rodillos fabricados por secciones, las cuales están unidas a un eje por medio de contracción. La geometría está definida por secciones cilíndricas de pared delgada (anillos), los cuales presentan la ventaja de poder ser reemplazados de manera

individual. Los materiales de fabricación presentan buenas características de resistencia a la abrasión y corrosión. Se utilizan en el proceso de briqueteado a altas temperaturas o de materiales abrasivos.

1.9.2.1.3 Rodillos perpendiculares

Un rodillo móvil o fijo se ubica como planetario y entre dos y cuatro rodillos, dependiendo del fabricante, se ubican como satélite(s), girando con velocidad angular en dirección opuesta.

Rodillo planetario fijo y rodillo(s) satélite(s) rotando a velocidad constante.

Rodillo planetario y satélite(s) girando a velocidad constante. (LLC, 2019)



Figura 1. 9: Rodillos perpendiculares, matriz plana

Fuente: Anyang Gemco Energy Machinery Co.

1.9.2.1.4 Prensas de rodillos paralelos

El principio de funcionamiento es el de prensado por constricción entre dos rodillos paralelos:

- Un rodillo fijo y el otro móvil.
- Dos rodillos móviles, con velocidad angular constante en dirección opuesta.

Tren de rodillos, en los cuales se realiza combinación de los arreglos anteriores. (Chacín, 2004)

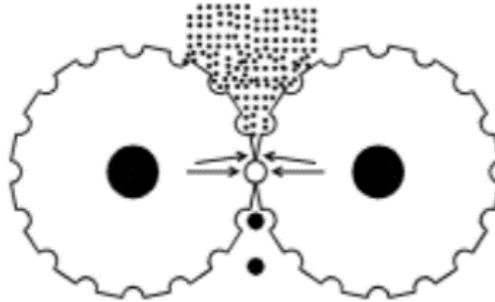


Figura 1. 10: Prensa briquetadora de rodillos paralelos

Fuente: Caracterización del proceso de densificación de biomasa residual proveniente de Palma de Aceite Africana (Tusa) 2016

1.9.2.2 Principio de prensado por impacto

La densificación se realiza bajo el principio de prensado por impacto o prensado por extrusión. En la Figura 1.11 se observa el mecanismo biela-manivela; aclarando, que la briqueta se forma en la cámara de compactación.

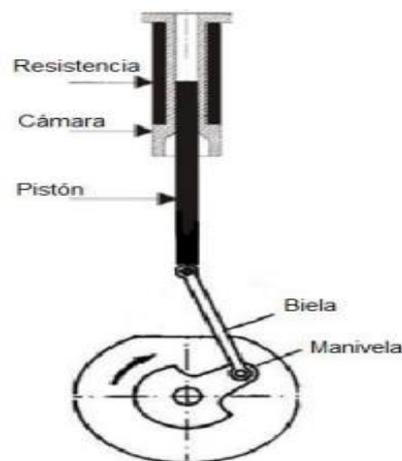


Figura 1. 11: Esquema de prensa briquetadora de pistón con sistema biela-manivela

Fuente: Caracterización del proceso de densificación de biomasa residual proveniente de Palma de Aceite Africana (Tusa) 2016

El mecanismo biela-manivela permite convertir un movimiento circular en movimiento lineal. El impacto o golpeteo es realizado por un pistón el cual trabaja mediante un mecanismo de tipo biela-manivela. Las producciones alcanzadas con el uso de este sistema de prensado oscilan de 1200 a 1500 kg/h. (Ortiz, 2008)

1.9.2.3 Principio de prensado por extrusión

Las prensas basadas en el principio de extrusión dependen del impulso axial ejercido

por medio de sistemas hidráulicos o neumáticos ejercidos sobre un pistón o por medio del empuje ejercido por tornillos sinfín:

1.9.2.3.1 Prensado por movimiento axial de pistón

El sistema de acción para compresión de la briqueta, corresponde a un mecanismo hidráulico con un único émbolo el cual produce movimiento axial a un pistón; cuyo accionamiento es manual o hidráulico. El pistón generalmente es accionado por un volante de inercia, el cual depende de un sistema hidráulico o neumático. La cámara de compresión es seguida por una tobera, permitiendo aumento de la presión; y a su vez, elevando el grado de compactación de la briqueta. La compresión produce un aumento de temperatura, la cual activa la lignina presente en la biomasa; dando lugar, a la compactación termoplástica y solidificación del material después del proceso de prensado. Las presiones alcanzadas en la prensa briquetadora por extrusión se encuentran dentro del rango de 110 a 140 MPa (Komarket, 2014).

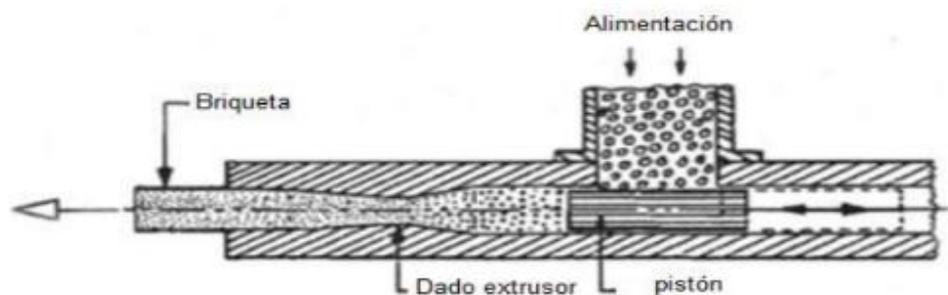


Figura 1. 12: Esquema de acción tomado de comparación de tecnologías de prensa briquetadora

Fuente: (Komarket, 2014)

1.9.2.3.2 Prensa para fabricación de briquetas de tornillo sinfín:

El principio de funcionamiento es el prensado por extrusión al igual que en el prensado por pistón. El tornillo sin fín es fabricado de acero al Níquel-Cromo o Carburo de Tungsteno; donde, la velocidad de avance y compactación del material dependen de la temperatura y del tipo de biomasa. El tornillo gira a velocidades variables, incorporando la biomasa en la entrada cónica de la cámara. Este procedimiento permite la activación de la lignina al aumentar la temperatura por compresión para la plastificación de la briqueta al solidificarse. El proceso de prensado por tornillo sinfín permite la fabricación de briquetas tubulares, aumentando la

velocidad de combustión (Ortiz, 2008). El uso de este tipo de prensa briquetadora permite alcanzar una mayor compactación de la biomasa; por lo cual, se obtiene una densidad del material a la salida aproximadamente de 1100 kg/m^3 , superiores a los anteriormente citados procedimientos de prensado (Z. Husain, 2002). El volumen de producción mediante este proceso se encuentra en el intervalo de 500 a 2500 kg/h. (Contreras, 2016)

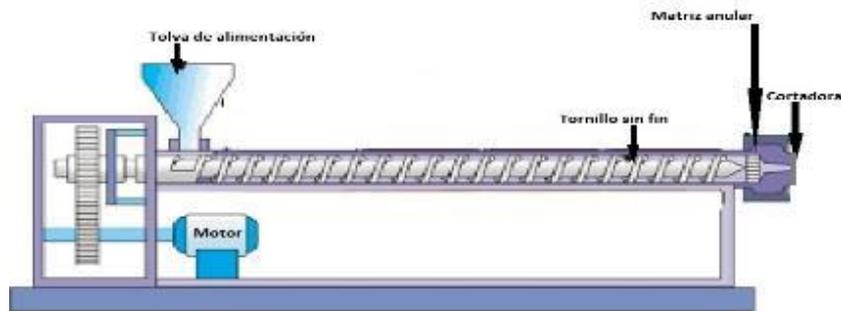


Figura 1. 13: Peletizadora de tornillo sin fin

Fuente: Grupo Nova Ágora

CAPITULO II

PELETIZACIÓN

En el capítulo presente se procedió a la tipificación de las materias primas, posteriormente a su tratamiento mecánico para acondicionar la materia en función que cumpla con los requerimientos para ser peletizada. Una vez peletizado el material se realizaron las pruebas de friabilidad según el método del golpe contra el suelo y sus respectivos análisis de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los pellets en sus distintas concentraciones de bio-carbón, arcilla, zeolita.

Las 3 materias primas que fueron adquiridas para las pruebas son las disponibles en el mercado local, siendo el bio-carbón el único que necesitó un tratamiento mecánico para cumplir las condiciones necesarias para su posterior uso.

El proceso necesario para peletizar el material está descrito en el flujograma adjunto, Anexo 22.



Figura 2. 1: Tratamiento mecánico del bio-carbón

En el tratamiento mecánico del material para que cumpla los requerimientos, previo a ser peletizado, se utilizó la trituradora de mandíbulas del laboratorio de ingeniería en

minas de la Universidad del Azuay con una granulometría inicial de hasta 10 cm hasta malla # 80 - 1 cm, y posteriormente al molino de bolas hasta obtener una granulometría de la malla # 16 - 1,18 mm.



Figura 2. 2: Granulometría inicial del bio-carbón

2.1 Tipificación de 3 materias primas disponibles en la región

2.1.1 Arcillas:

Se tipificó 3 arcillas locales las cuales se analizaron y se decidió trabajar con la arcilla Bentotec de Ecuaminerales ya que es la que mayor plasticidad presentó en los resultados siendo la característica que genera un mejor aglutinamiento de las materias primas.

2.1.2 Bio-carbón

Para el tratamiento mecánico del bio-carbón se utilizó la trituradora de mandíbulas con una granulometría inicial de hasta 10 cm hasta malla # 80 - 1 cm, y posteriormente en el molino de bolas hasta obtener una granulometría de la malla # 16 - 1,18 mm luego el material fue tamizado y cuarteado.



Figura 2. 3: Bio-carbón molido

2.2 Tamizado

Se analizaron 3 tipos de granulometría, 8, 10 y 16 y se decidió trabajar con la # 16 que es la de menor tamaño y el material con granulometría superior se sometió a molienda nuevamente hasta que cumpla las características, ya que a menor tamaño de partícula mayor superficie de contacto.



Figura 2. 4: Tamizado del bio-carbón por las mallas # 8, # 10 y # 16

2.3 Cuarteo

Se procedió a cuartear los materiales para lograr una muestra representativa y homogénea.

2.4 Dosificación de la materia prima

Se preparó un total de 2000g de cada una de las nueve muestras en sus diferentes concentraciones de bio-carbón, bentonita y zeolita. Como muestra la figura 2.6, las proporciones de (C) y (Ze) son iguales en cada muestra, mientras que la (Be) aumenta en un 10% según la muestra, iniciando la primera M1 con un 10 % hasta la M9 con un 90%.

Una vez pesado cada uno de los elementos se procede a homogenizar la muestra en un recipiente plástico de 4lt de capacidad de forma manual y, con la ayuda de un embudo, se almacenó en una botella plástica.



Figura 2. 5: Dosificación de las nueve muestras



Figura 2. 6: Dosificación primera muestra

Una vez dosificado el material se continua a homogenizarlo en un recipiente hasta obtener un color homogéneo de la mezcla.



Figura 2. 7: Homogenización del material

2.5 Máquina peletizadora

La máquina peletizadora es del tipo de prensado por extrusión, que empuja el material mediante un tornillo sin fin hasta la matriz plana donde es compactado en la forma de la matriz y al final el pellet es cortado por una cuchilla.

# de rpm	50-120 rpm
Potencia	340 watts
Consumo de energía	120 v
Volumen tolva	0,098 m ³
Cuchilla de corte	Acero Quirúrgico
Vástago de presión	5,34 kg

Tabla 2. 1: Características de la máquina peletizadora

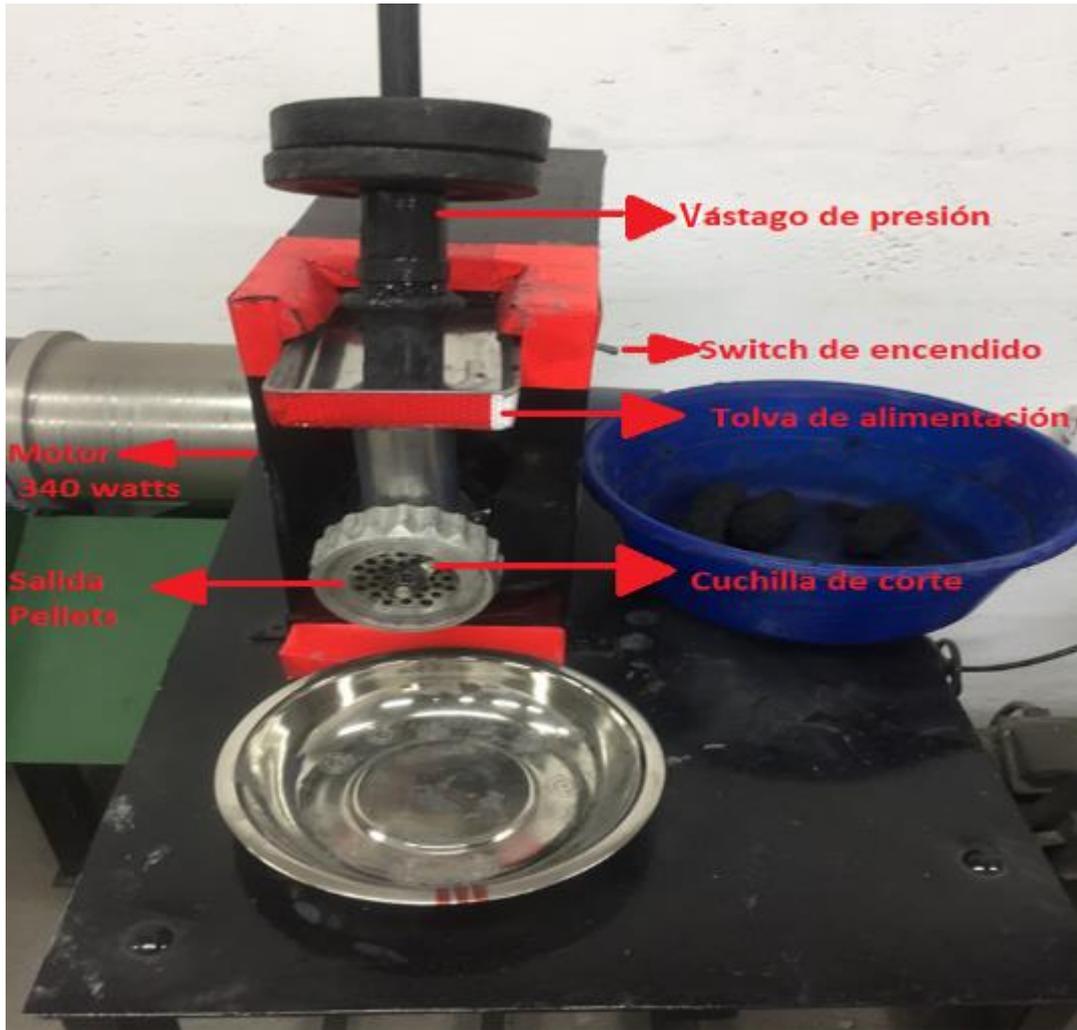


Figura 2. 8: Máquina peletizadora

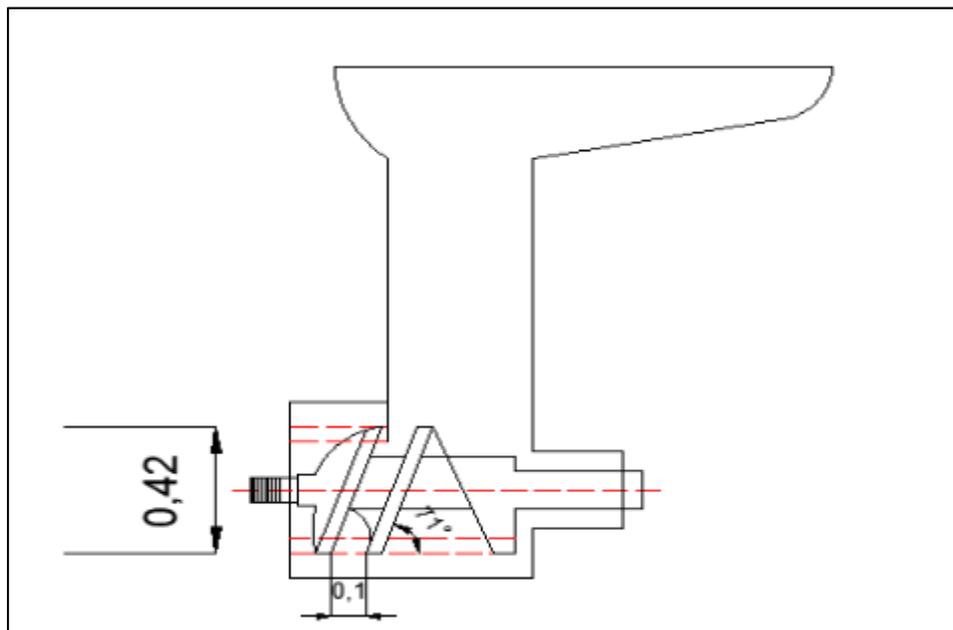


Figura 2. 9: Tornillo sin fin

2.7 Pruebas de peletización

2.7.1 Acondicionamiento del material

El material homogenizado se procede a humedecer con la mitad del total de agua y se mezcla hasta homogenizar y a continuación se añade el resto del agua para mezclar una última vez hasta obtener una mezcla de color y textura homogénea.



Figura 2. 10: Acondicionamiento del material

Para la determinación de la humedad óptima de pelletización del compuesto se determinó el límite plástico de los compuestos con los límites de Atterberg, estableciéndose en un valor mínimo aproximado del 10% y un máximo del 15%, estos límites varían según la dosificación de muestra y con un 8% el material no logró ser pelletizado.



Figura 2. 11: Homogenización del material

2.8 Peletización

Se peletizó 18 muestras en total, se dividió en dos lotes de 9 muestras con diferentes concentraciones, cada lote se manejó con diferente presión del vástago, la primera con fuerza relativamente constante y la segunda con una presión del vástago de $44,5 \text{ kg/m}^2$.

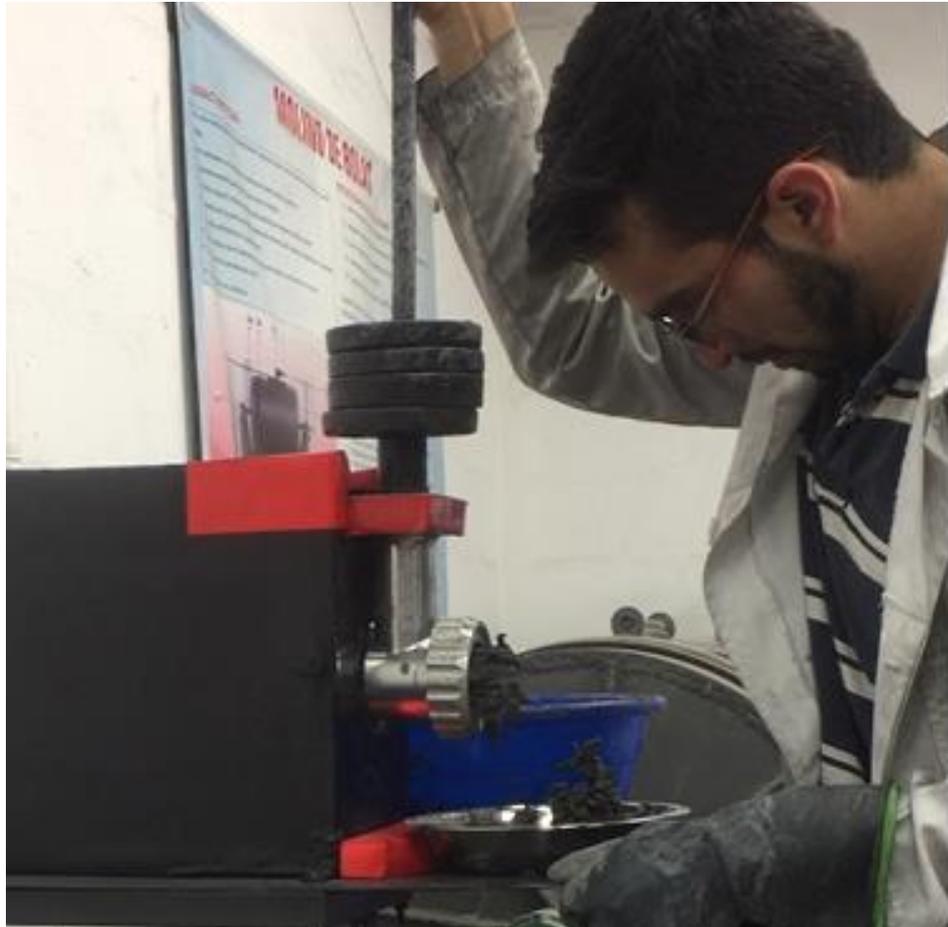


Figura 2. 12: Pruebas de peletización

Los parámetros del ensayo están descritos en la tabla 3.14, el primer lote se realizó con una fuerza de presión del vástago variable aplicando la fuerza de la mano que trata de ser constante y en algunas muestras necesitando una mayor fuerza de presión.

En la tabla 3.14 y 3.15 se aprecia las distintas cantidades de agua necesarias para peletizar, según las composiciones de cada muestra.

Los parámetros de peletización del segundo lote se describen en la tabla 3.15 la cual se realizó con una presión del vástago de $44,5 \text{ Kg/m}^2$ en un área de $0,12 \text{ m}^2$ con un peso total de $5,34 \text{ kg}$.



Figura 2. 13: Pellets de las nueve muestras

2.9 Secado de pellets

El secado de los pellets se realizó en un horno a 98 ° C, durante 5 horas y cada 30 minutos se pesó la muestra para obtener el porcentaje de pérdida de agua según el tiempo de secado.



Figura 2. 14: Secado de pellets en el horno

2.10 Análisis de pellets

Se analizaron 28 pellets de cada una de las muestras, de los cuales, se recolectó información de su tamaño y peso con lo cual se determinó su volumen, masa y

densidad real y aparente.

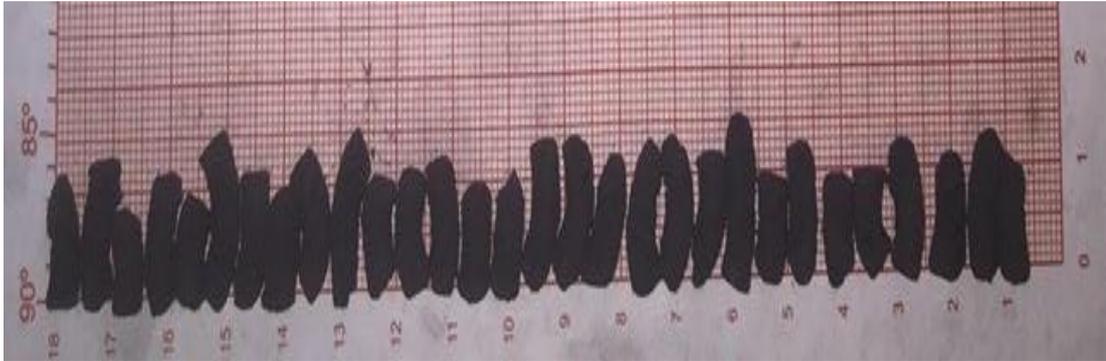


Figura 2. 15: Análisis de los Pellets

2.11 Pruebas de resistencia mecánica de los pellets

Según la prueba de friabilidad se arrojaron 100 pellets al suelo en caída libre, y se contaron cuantos se fracturaron en más de dos partes según (Marcos & Camps, 2002) se utiliza la fórmula adimensional.

$$FR1 = NI/NF$$



Figura 2. 16: Prueba de friabilidad

2.12 Pruebas de capacidad de intercambio catiónico

Las muestras para la prueba de intercambio catiónico fueron analizadas por el INIAP (Instituto Nacional Autónomo de Investigación Agropecuarias, Estación Experimental del Austro).

CAPITULO III

ANÁLISIS Y RESULTADOS

Se logró la tipificación de 3 arcillas locales descritos en las tablas (3.3- 3.4- 3.5), de las cuales, se seleccionó la que mayor plasticidad presentó para poder aglutinar el bio-carbón y la zeolita descritos en las tablas (3.3- 3.7) respectivamente. En la tabla 3.1 se muestra la dosificación de las 9 muestras en porcentaje con diferentes concentraciones de materia para analizar el comportamiento físico y químico de las mismas al ser peletizado, la mezcla en algunos casos, requirió mayor cantidad de agua o presión y estos se describen en los parámetros de peletización, y a continuación se analiza las características de los pellets y sus pruebas de resistencia mecánica y capacidad de intercambio catiónico.

	M1 (%)	M2 (%)	M3 (%)	M4 (%)	M5 (%)	M6 (%)	M7 (%)	M8 (%)	M9 (%)
Bio-carbón	45	40	35	30	25	20	15	10	5
Arcilla	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Zeolita	45	40	35	30	25	20	15	10	5
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabla 3. 1: Dosificación en porcentaje

3.1 Tipificación de las materias primas

3.1.1 Bio-carbón

En la siguiente tabla se muestra la caracterización del bio-carbón.

Características	
Fórmula:	C
Densidad, peso real:	0,4 a 0,5 g/cm ³
Humedad:	2,9-3,7 %
pH:	8,1

Granulometría:	Mesh # 16	1,18 mm
----------------	-----------	---------

Tabla 3. 2: Características del bio-carbón

3.1.2 Arcillas

En las tablas a continuación se describen las características de las arcillas locales tipificadas, de las cuales, la que mayor plasticidad presentó fue la bentonita de ecuaminerales (tabla 3.3).

Características Físicas				
Densidad:	2.29 g/cm ³	Sílice cristalina:	Trazas <1%	
Gravedad específica:	2.6	Viscosidad Lectura @600 r.p.m:	13	
Humedad:	10% máx.	Viscosidad Lectura @600 r.p.m:	8	
Solubilidad en agua:	Insoluble	Viscosidad plástica:	7 Cp	
pH:	8.6	Rendimiento filtrado (30 min):	12 mL	
Apariencia y olor:	blanco– cremoso, sin olor	Granulometría:		
Mínimo de contenido de montmorrillonita:	74%	Malla	Retenido	
		40	6% máx.	
		60	12% máx.	
		100	20% máx.	
Características Químicas				
Intercambio	Catiónico	Composición química		
Catión	meq/100 g	Silicio	SiO ₂	62.45%
Mg	6.59	Aluminio	Al ₂ O ₃	8.29%
Ca	99.47	Hierro	Fe ₂ O ₃	1.99%
K	1.51	Sodio	Na ₂ O	3.35%
Na	94.97	Magnesio	MgO	4.80%
		Calcio	CaO	2.66%
		Potasio	K ₂ O	2.08%
Total:	202.55 meq/100g	Pérdida por calcinación: 14.37%		

Tabla 3. 3: Características de Bentonita

Autor: Ecuaminerales-BENTOTEC

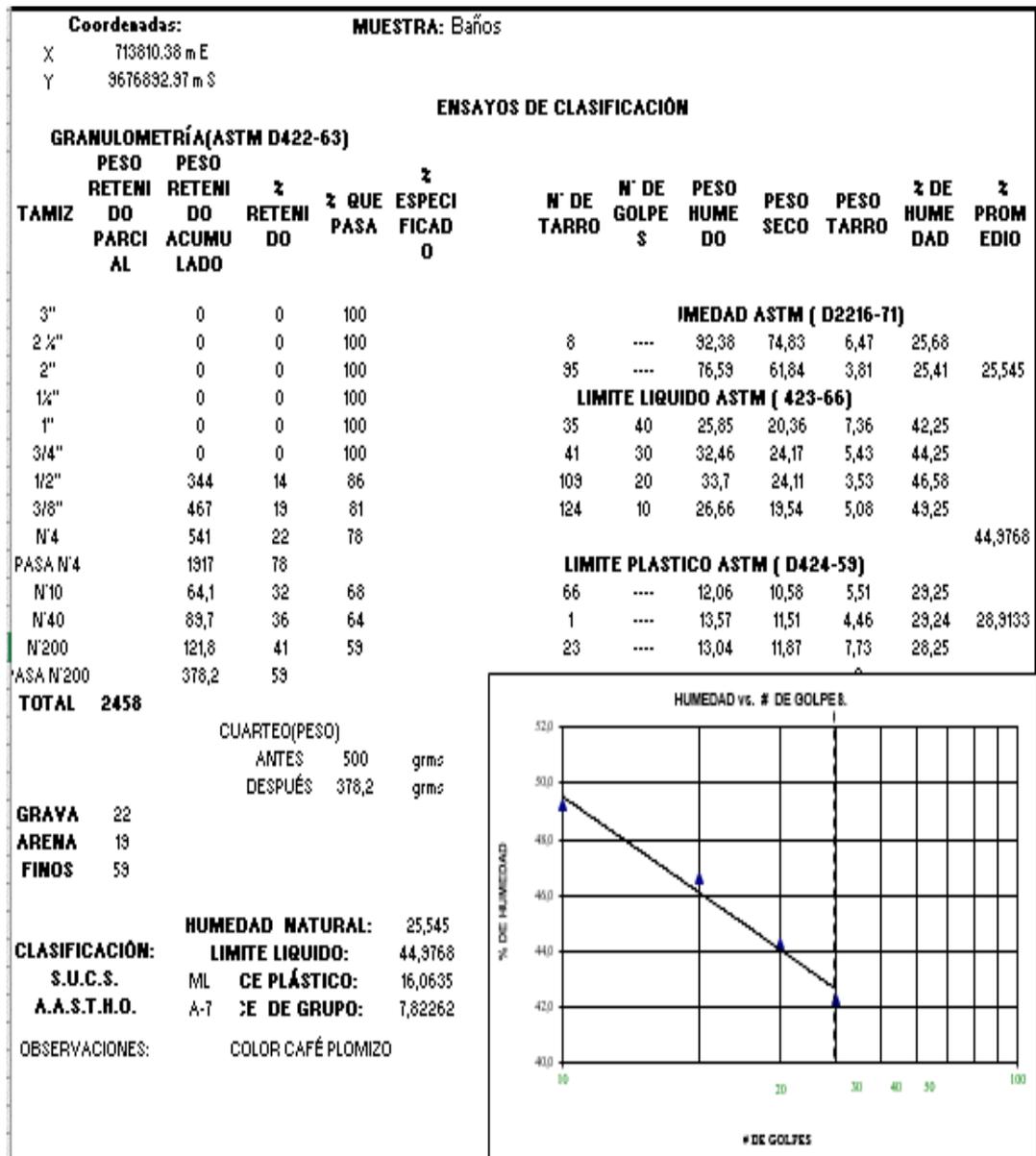


Tabla 3. 4: Características de arcilla muestras de Baños

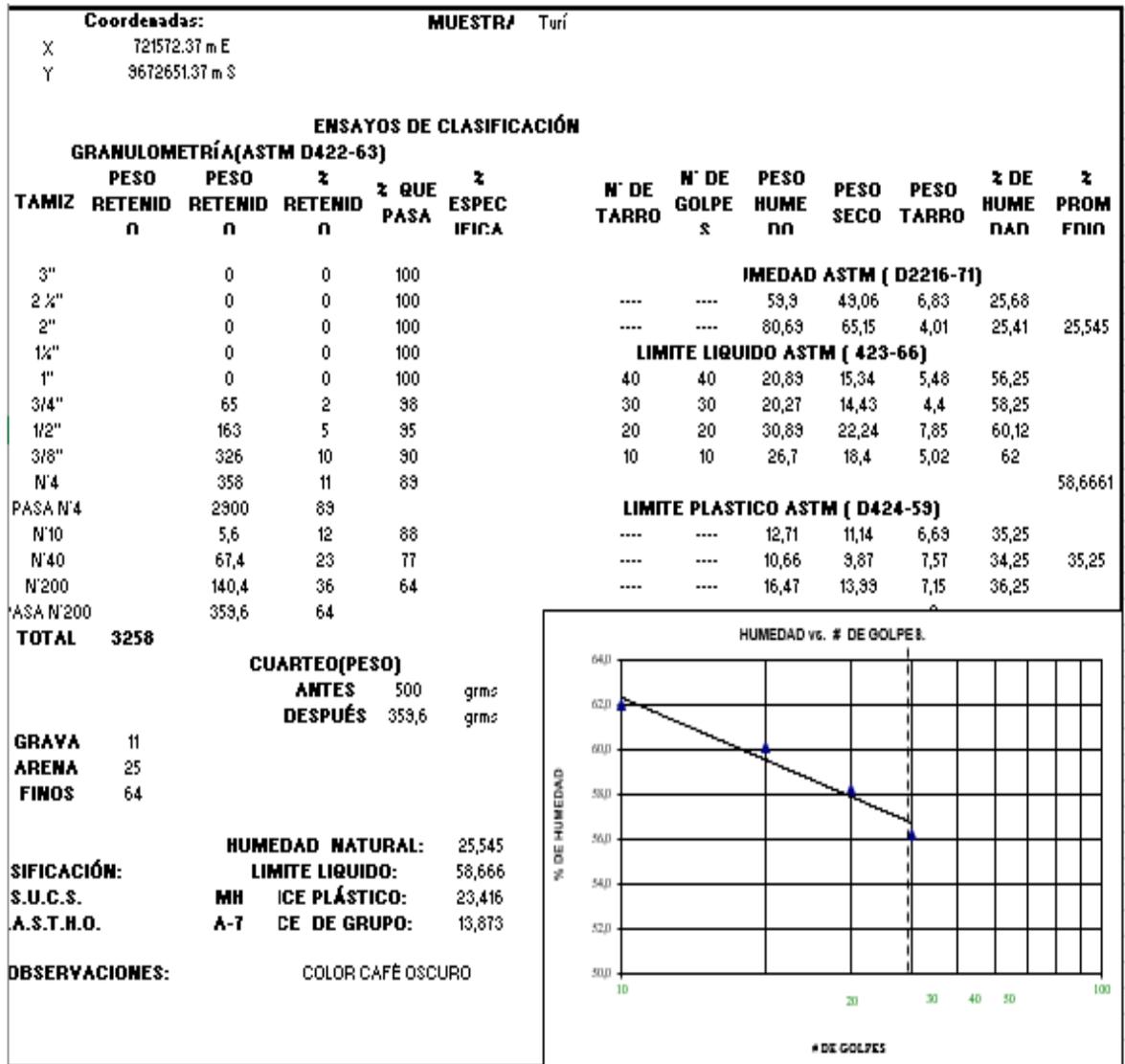


Tabla 3. 5: Características de arcilla muestras de Turi

3.1.3 Zeolita

La zeolita utilizada corresponde al tipo heulandita.

Características Físicas	
Fórmula:	$(Ca,Na_2,K_2)_4 Al_8 Si_{24} O_{96} H_2O$
Densidad/ Peso real:	2,18 - 2,24 g / c m3
Humedad:	5 % - 10 %

pH:	8,54	
Apariencia y olor	Verde agua a café amarillento; Inodoro	
Clinoptinolita, heulandita:	3 5 % - 6 0 %	
Granulometría:	mesh # 8 a 1 0 ; F i n a , mesh # 4 0 - 5 0	
Características Químicas		
Elementos mayores		
Elemento	Fórmula	%
Silicio	SiO ₃ :	71
Aluminio	Al ₂ O ₃ :	10
Hierro	Fe ₂ O ₃	2
Calcio	Ca	0,05
Magnesio	MgO	0,7
Azufre	SO ₃	0,4
S o d i o	Na ₂ O	0,8
Potasio	K ₂ O	1,9
Intercambio Catiónico :	40 a 120 meq/100g	

Tabla 3. 6: Características físicas y químicas de la zeolita

Fuente: insumos agropecuarios Villagro

3.2 Dosificación de la materia prima

Se realizó una combinación de los materiales variando en todas las concentraciones posibles para analizar su comportamiento físico y químico en cada caso.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
	(g)								
Bio-carbón	900	800	700	600	500	400	300	200	100
Arcilla	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800
Zeolita	900	800	700	600	500	400	300	200	100
Total	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000

Tabla 3. 7: Dosificación en peso (g)

3.3 Parámetros de peletización

En las primeras muestras, la mezcla presenta mayores requerimientos de agua para poder ser peletizado con facilidad y evitar atascos del material.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Muestra (g)	2000	2000	2000	1993	1998	1997	1975	1999	1998
Recipiente (g)	882	835	900	850	834	847	828	866	814
Agua (ml)	135	130	125	110	110	110	110	110	110
Muestra peletizada (g)	2755	2530	2611	2481	3365	2339	2201	2203	2284
Pellets secos	1663	1656	1669	1625	1629	2419	2234	2301	2014

Tabla 3. 8: Parámetros de ensayo 1

Las siguientes pruebas se realizaron con una presión del vástago de 44,5 Kg/m² en un área de 0,12 m² con un peso total de 5,34 kg.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Muestra (g)	1997	1997	1998	1999	2000	2000	2000	1999	1995
Recipiente (g)	881	835	900	851	833	846	828	866	817
Agua (ml)	130	130	125	110	100	100	120	100	100
Muestra peletizada (g)	2516	2576	2456	2505	2339	2269	2068	1849	1921
Pellets secos	1511	1519	1522	1602	1501	1507	1290	1178	1226

Tabla 3. 9: Parámetros de ensayo 2

3.4 Acondicionamiento de pellets

En un horno eléctrico se secaron las muestras a 98 °C hasta eliminar el total del agua utilizada, a continuación, se observa el porcentaje total de pérdida de agua en el secado de cada una de las muestras.

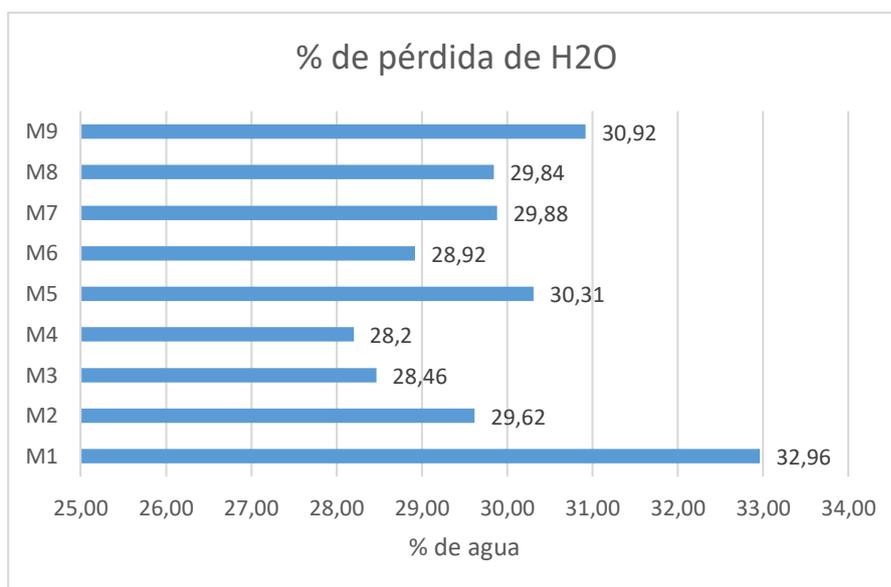


Figura 3. 1: Porcentaje de pérdida de agua

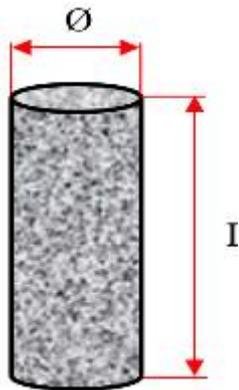
La muestra se pesó cada 30 minutos durante el secado obteniendo la tabla 3.10

t = (min)	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	M4 (g)	M5 (g)	M6 (g)	M7 (g)	M8 (g)	M9 (g)
0	3947	4136	3183	3738	3669	3662	3531	3462	3515
30	3838	4085	3074	3688	3554	3587	3452	3383	3449
60	3694	3997	2960	3606	3416	3488	3347	3251	3349
90	3509	3938	2824	3548	3239	3423	3282	3054	3062
120	3354	3846	2716	3457	3085	3331	3184	2897	2997
150	3227	3801	2614	3413	2957	3284	3133	2770	2865
180	3131	3712	2543	3329	2871	3182	3042	2683	2767
210	3022	3629	2454	3257	2770	3116	2972	2584	2652
240	2915	3557	2387	3173	2693	3055	2921	2499	2537
Peso final (g)	2646	2911	2277	2684	2557	2603	2476	2429	2428

Tabla 3. 10: Pérdida de humedad según el tiempo de secado

3.5 Análisis de pellets

En el anexo 19 y 20 se observan los datos de las dimensiones y el peso de los 28 pellets analizados de las 9 muestras de los 2 ensayos.



$$\varnothing = 5 \text{ mm}$$

$$\bar{I} = 11,6 \text{ mm}$$

Volumen pellet

$$v = \pi \cdot r^2 \cdot l \tag{4}$$

Figura 3. 2: Dimensiones pellet

$$v = \pi \cdot (0,005)^2 \cdot (0,0116)$$

$$v = 0,0018 \text{ m}^3$$

Densidad real o específica

$$\rho = \frac{m}{v}$$

En las tablas 3.11 y 3.12 se observan las características de los pellets obtenidos con la variación de presión del vástago.

Ensayo 1	Muestra 1.1	Muestra 2.1	Muestra 3.1	Muestra 4.1	Muestra 5.1	Muestra 6.1	Muestra 7.1	Muestra 8.1	Muestra 9.1
Diámetro (m)	0,005								
Largo (m)	0,0163	0,0128	0,0127	0,0113	0,0128	0,0145	0,0099	0,0098	0,0110
$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$	0,008073	0,007981	0,008245	0,008397	0,009689	0,010026	0,012071	0,012720	0,014521
Masa (Kg)	0,000252	0,000179	0,000188	0,000171	0,000208	0,000250	0,000184	0,000204	0,000249
Densidad real	787,512	715,920	752,090	772,110	832,668	878,981	952,764	1062,139	1153,272
Densidad aparente	394,620	399,214	413,203	419,910	466,572	497,693	570,142	629,726	689,335

Tabla 3. 11: Características pellets ensayo 1

El primer ensayo se realizó con una presión de la mano relativamente constante mientras el segundo ensayo se realizó con una presión del vástago de 44,5 Kg/m².

Ensayo 2	Muestra 1.2	Muestra 2.2	Muestra 3.2	Muestra 4.2	Muestra 5.2	Muestra 6.2	Muestra 7.2	Muestra 8.2	Muestra 9.2
Diámetro (m)	0,005								
Largo (m)	0,0136	0,0119	0,0103	0,0093	0,0106	0,0125	0,0122	0,0091	0,0095
$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$	0,007748	0,008073	0,007839	0,007981	0,008113	0,008245	0,008245	0,008397	0,009161
Masa (Kg)	0,000198	0,000144	0,000159	0,000128	0,000186	0,000215	0,000220	0,000205	0,000218
Densidad real	740,082	616,839	787,683	706,296	892,396	877,069	919,334	1147,393	1172,734
Densidad aparente	411,149	406,451	419,890	427,643	493,473	510,607	614,748	647,847	739,564

Tabla 3. 12: Características pellets ensayo 2

3.6 Pruebas de resistencia mecánica de los pellets

Los valores de la prueba de friabilidad se obtuvieron con la formula adimensional de el número de pellets iniciales dividido para el número de pellets resultantes de la prueba del golpe contra el suelo descritos en la tabla 3.13.

Pruebas de Friabilidad		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9
Ensayo 1	NI	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	NF	137	117	104	104	102	102	100	100	100
	$FR1 = \frac{NI}{NF}$	0,73	0,85	0,96	0,96	0,98	0,98	1,00	1,00	1,00
Ensayo 2	NI	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	NF	112	106	103	102	102	101	100	100	100
	$FR2 = \frac{NI}{NF}$	0,89	0,94	0,97	0,98	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00

Tabla 3. 13: Índices de friabilidad

La variación de la fuerza de presión también influye en la friabilidad del pellet, ya que se puede ver en la prueba de friabilidad 1 que la capacidad de resistencia es menor a la resistencia de la prueba de friabilidad 2 donde se utilizó una presión mayor del vástago.

En la figura 3.3 se puede apreciar que la variación de la friabilidad esta estrechamente ligada con la cantidad de bentonita aglutinante ya que a menor proporción de bentonita, menor es la capacidad de resistencia al golpeo.

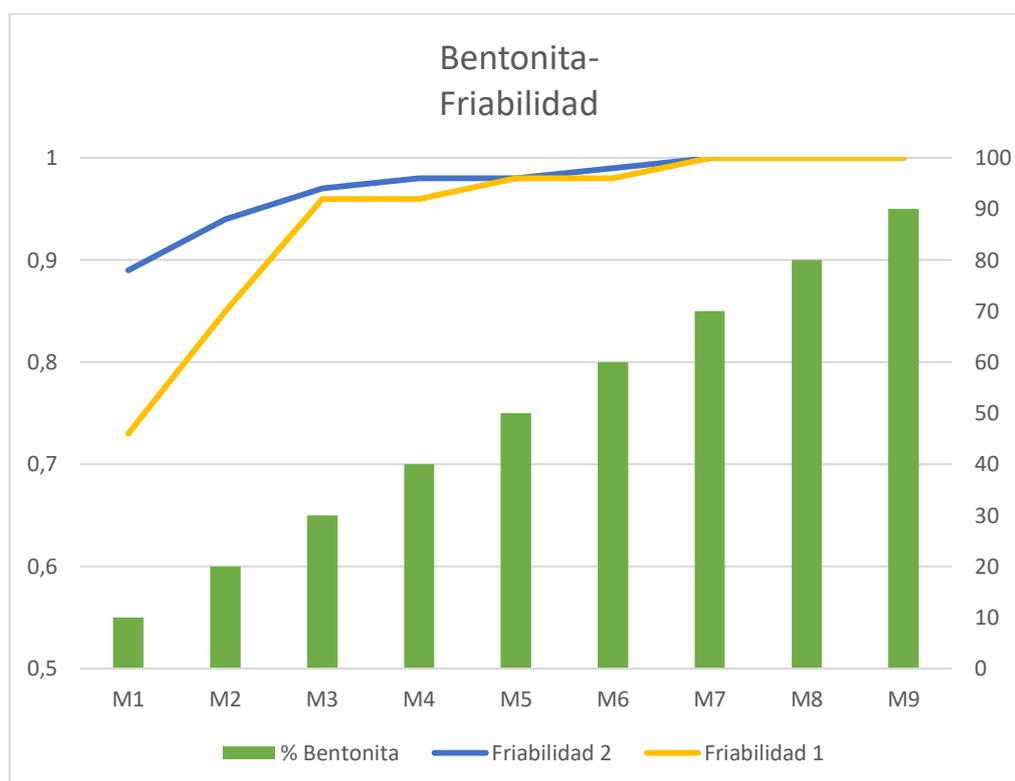


Figura 3. 3: Relación friabilidad vs porcentaje de bentonita

Desde la muestra 3 hasta la 9 (30-90% de bentonita respectivamente) los pellets presentaron una friabilidad relativamente constante equivalente a buena. La muestra 9 con un 90% de bentonita fue la que mayor resistencia presentó, y la que menor resistencia presentó fue la muestra 1 que es la de menor cantidad de bentonita.

3.7 Pruebas de capacidad de intercambio catiónico

Los análisis de CIC nos muestra que la muestra 5 es la que mayor CIC presenta teniendo una concentración de (50-25-25%) bentonita-carbon-zeolita

respectivamente, la muestra 9 (90-5-5%) bentonita-carbón-zeolita presentó la menor capacidad de intercambio iónico por su baja concentración de zeolita, también depende de la relación existente Si/Al de los compuestos.

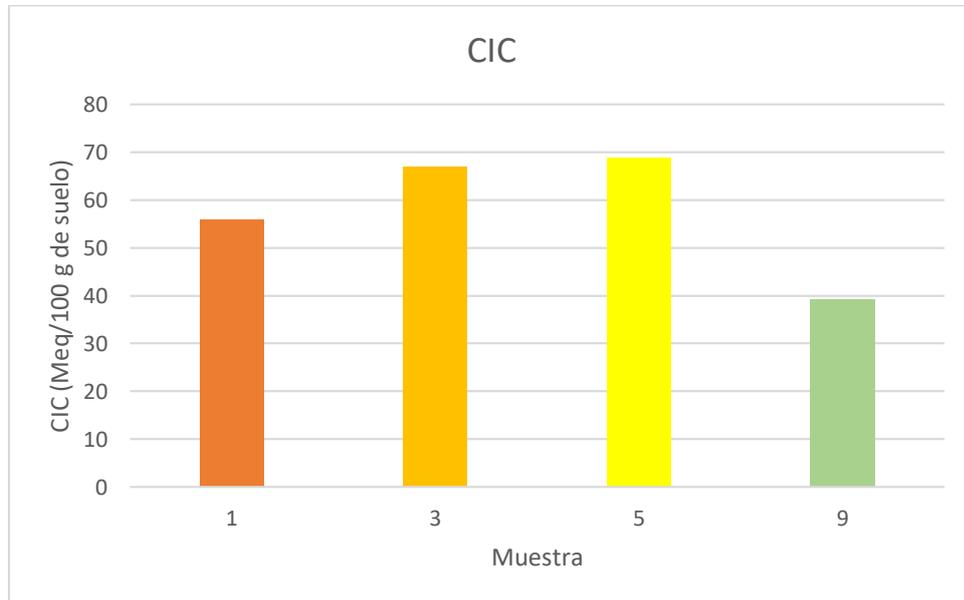


Figura 3. 4: CIC Muestras 1, 3, 5, 9.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

La ventaja que ofrece el pellet elaborado es la posibilidad de generar una dosificación adecuada de cada elemento en un densificado para garantizar el cumplimiento de su objetivo, uno de esos podría ser el disponer de una suficiente resistencia mecánica para su aspersión mediante cañones de aire y cubrir grandes superficies, esto no sería posible si se usara los mismos elementos dispersos uno por uno ya que el viento y el resto de agentes erosivos los arrastraría fácilmente, y tampoco se lograría una distribución homogénea de los diferentes compuestos.

Otro uso importante que se podría realizar es agregar los pellets a filtros de fluidos que impidan que los sistemas de filtración se obstruyan debido a su granulometría relativamente mayor, y que por su carácter expansible, las arcillas sean fácilmente arrastradas por el flujo a tratar y se apelmacen si no están fijos en un granulo o pellet, por lo cual se puede incrementar el tamaño de su geometría para adecuar a filtros a escala piloto o comercial y poder procesar mayores cantidades de fluidos.

El uso de arcillas y zeolitas naturales o modificadas es un método efectivo en la remoción de cadmio, cobre y plomo en soluciones acuosas como describe el estudio de (Ramos D, 2018).

Como describe (Calderón & Zuñiga, 2017) el uso del bio-carbón con arcilla muestra una gran capacidad de retener los malos olores para el tratamiento de residuos orgánicos, y con los pellets se obtendría una dosificación adecuada al caso, debido a su capacidad de retener malos olores por lo que también pueden ser usados como cama de animales.

Dada su capacidad de intercambiar minerales, la zeolita es eficaz para uso como sustrato en cultivos hidropónicos señala (Stamatakis, & Kamenou, 2001), y por su estructura en forma de panal es capaz de retener y liberar de forma lenta los nutrientes, agua y plaguicidas, lo que la hace eficaz en la protección de cultivos contra plagas y enfermedades (Bybordi, Saadat, & Zargaripour, 2017) es por eso su uso en la agricultura sustentable.

La activación de los compuestos se puede realizar para mejorar sus propiedades, teniendo en cuenta que en exceso también es perjudicial, en el caso de las arcillas y zeolitas la activación se realiza con soluciones acidas o sódicas y el bio-carbón puede ser activado de manera física o químicamente, al igual que las propiedades del bio-carbón dependen del tipo de pirólisis que se utilice en la fabricación del mismo, según el estudio de (Durán, 2017).

RECOMENDACIONES

- Para determinar los límites líquidos, máximos y mínimos de la combinación de los materiales a peletizar se recomienda empezar por los límites máximos de agua e ir disminuyendo según las pruebas hasta encontrar el mínimo y no ocasionar atascos ni daños en la máquina.
- Se recomienda dar seguimiento al análisis de la efectividad y eficiencia de estos sistemas de retención de metales pesados ya que por la complejidad de los procesos de difusividad en las zeolitas, son procesos a largo plazo.
- La pirólisis es un punto en el que se debe hacer énfasis, ya que de este proceso depende sus diferentes capacidades del bio-carbón de retener los metales con mayor afinidad unos de otros elementos, dependiendo del tipo de pirólisis en el tiempo y la temperatura para crear una mayor o menor área superficial o con diferentes microporosidades.
- Se debe continuar el estudio en la incorporación a los pellets de nuevas sustancias como caolines, sílices y arenas, así como diferentes tipos de arcillas y zeolitas.
- El comportamiento de la combinación de arcillas, biocarbones y zeolitas y su comportamiento individual o con otros elementos, se debe analizar debido a que su capacidad de adsorción varía ante la presencia de otro compuesto.
- Las propiedades adsorbentes de los materiales son un mecanismo eficiente y

sostenible para el tratamiento de suelos y aguas contaminadas con metales pesados, los estudios deben continuar tomando en cuenta la selectividad de los materiales por ciertos metales, la concentración de metales, el Ph de la solución, la dosis de adsorbente, temperatura, presencia de otros elementos y la activación de los materiales con soluciones ácidas o sódicas para potenciar sus propiedades.

- La variación de la granulometría de la materia prima es otro factor que puede influenciar positivamente o negativamente en los resultados es por ello que se debe analizar minuciosamente.

BIBLIOGRAFÍA

- Adriano, D. (2001). Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risk of Metals. .
- Ahmad, M. A. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water. In *A review. Chemosphere*.
- Ahmed, H. (2013). Removal of heavy metals from wastewater using agricultural and industrial wastes as adsorbents.
- Ali, H., Khan, E., & Anwar, M. (2013). Phytoremediation of heavy metals. In *Concepts and applications Chemosphere*.
- Anastopoulos, I., & Kyzas, G. (2015). Progress in batch biosorption of heavy metals onto algae. In *Journal of Molecular Liquids*. .
- Antelo, J. A. (2005). Effects of pH and ionic strength on the adsorption of phosphate and arsenate at the goethite±water interface. J. . In *Colloid Interface Sci*.
- Antelo, J. A. (2015). Arsenate and phosphate adsorption on ferrihydrite nanoparticles. . In *Synergetic interaction with calcium ions*.
- Arocena, J. V.-C. (2012). Granular soil structure indicates reclamation of degraded to productive soils: A case study in southeast Spain. . In *Can. J. Soil Sci*.
- Arraigada, R. R. (2001). Retención de Cromo y Mercurio con Zeolitas Naturales y Sintéticas. In *Informe Interno de la Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción*. Chile.
- Athanasiadis, K. Y. (2005). Influence of chemical conditioning on the ion exchange capacity and on kinetic of zinc uptake by clinoptilolite. In *Water Research*.
- B. Makhoukhi, M. A. (2009). Acid activation of Bentonite for use as a vegetable oil bleaching agent. In *Grasas y aceites* .
- Babel, S. T. (2003). Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water. *Journal of Hazardous Materials*.

- Barakat, M. (2011). New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. . In *Arabian Journal of Chemistry* 4.
- Beltran, R. (2009). Diseño Geotecnico y Estructural de una cimentación. México: UNAM . Mexico.
- Bolan, N. K. (2014). Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils ± To mobilize or to immobilize?. . In *J. Hazard. Mater.*
- Borma, L. M. (1996). Estudo sobre a mobilidade de metais pesados em solos argilosos. In 8° *Congreso Brasileiro de Geologia de Engenharia*. Rio de Janeiro.
- Bradshaw, J. &. (1997). The search for selective ion ligating agents. . In *Acc. Chem. Res.*
- Breck, D. (1974). Zeolite Molecular Sieves. In *John W. & Sons* (p. 771). New York .
- Bybordi, A., Saadat, S., & Zargaripour, P. (2017). The effect of zeolite, selenium and silicon on qualitative and quantitative traits of onion grown under salinity conditions. . In *Archives of Agronomy and Soil Science* 1: 1-11. .
- Cabe, M. (1991). Operaciones unitarias en ingeniería química . Madrid.
- Cabrera, C. C. (2005). Sorption characteristics of heavy metal ions by a natural zeolita. In *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*.
- Calderón, M., & Zuñiga, P. (2017, marzo). Utilizacion de acicula de pino y arcillas adsorbentes para el manejo de residuales organicos provenientes de camal.
- Campos Michelena, M. m. (2008). Los Biocombustibles 2da edicion . Mundi prensa .
- Campos, M. M., & Marcos, M. F. (2008). Los biocombustibles (2a. ed.). In *Mundi Prensa*.
- Celis R., K. W. (2000). Triadimefon interactions with organoclays and organohydrotalcites. . In *Soil Sci. Soc. .*

- Cerezo P., V. C. (2003). Aproximación al estudio de complejos maleato de timolol-sepiolita para su uso en farmacia. . In *In VI Congreso de la Sociedad española de Farmacia Industrial y Galénica*.
- Cha, J. S.-C.-K.-C.-K. (2016). Production and utilization of biochar. In *A review. J. Ind. Eng. Chem.*
- Chabalina, L. P. (1991). Estudio de intercambio de equilibrio de metales pesados en zeolitas naturales cubanas . In *Memorias 3era Conferencia Internacional Zeolitas Naturales (Parte II)*.
- Chacín, F. P. (2004). Obtención de DRI (Hierro de reducción directa) a partir de briquetas auto reductoras de concentrado de mineral de laterita ferruginosa. Caracas .
- Chen, B. D. (2008). Transitional adsorption and partition on nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures. . In *Environ. Sci. Technol.*
- Chen, Q. L. (2009). Precipitation of heavy metals from wastewater using simulated flue gas: sequent additions of fly ash, lime and carbon dioxide. In *Water Residual*.
- Chojnacki, A. K. (2004). The application of natural zeolites for mercury removal: from laboratory testes to industrial scale. . In *Mineral Engineering*.
- Clarke, C. (1980). Zeolites: Take off for the Tuff Guys.
- Contreras, H. C. (2016). Caracterización del proceso de densificación de biomasa residual proveniente de Palma de Aceite Africana (Tusa) . Bogota .
- Curi, A. G. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. In *Información tecnológica*.
- D. Ross, y. Q. (1995). Recommended Methods for Determining Soil Cation Exchange Capacity. . In *Recommended Soil Testing Procedures for the Northeastern United States* .

- Dabrowsky, A. P. (2004). Selective removal of the heavy metal from waters and industrial wastewaters y ion-exchange method.
- Dal Bosco, S. R. (2005). Removal of toxic metals from wastewater by Brazilian natural scolecite. In *Journal of Colloid and Interface Science*.
- Dechene, A. I. (2014). Sorption of polar herbicides and herbicides metabolites by biochar-amended soil. . In *Chemosphere*. .
- Delgadillo, A., González, C., Prieto, F., Villagómez, J., & Acevedo, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. In *Tropical and Subtropical Agroecosystems*.
- Demirbas, A. (2000). Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reaction of biomass. In *Energ. Convers*.
- Demirbas, A. (2007). The influence of temperature on the yields of compounds existing in bio-oils obtained from biomass samples via pyrolysis. . In *Fuel Process Technol*.
- Domenech, X., & Peral, J. (2008). Química Ambiental de Sistemas Terrestres . Barcelona.
- Durán, E. (2017). Arcillas y biocarbones para la eliminación de contaminantes de origen agrícola en aguas: ensayo en filtro a escala precomercial. . Sevilla.
- Englert. (2005). Characterization and environmental application of a Chilean natural Zeolite. In *International Journal of Mineral Processing*.
- Erdem.E., N. K. (2004). Donat, The removal of heavy metal cations by natural zeolites. . In *Journal of Colloid and Interface Science*.
- Escalante. (2016). Biobio-carbón (Biochar) Naturaleza, fabricación y uso en el suelo. *Red de Revistas Científicas de América Latina*.
- Essington, M. (2005). Soil and Water Chemistry: An Integrative Approach. . In *CRC Press*. .

- Faghihian, H. Y. (2005). Adsorption of chromate by clinoptilolite exchange with various metal cation. In *Water Research*.
- Fernandes, M. C. (2002). Application of chromium in different rates and oxidation states to soils. I. Effect on dry matter yield and Cr uptake by radish. . In *Commun. Soil Sci. Plant Analysis* 33.
- Garcia, M. (2002). Materiales zeolíticos: síntesis, propiedades y aplicaciones. In *Informe Interno, Dep. de Química Inorgánica, Universidad de Alicante*. España .
- González, M., Navarroa, R., Saucedoa, I., Avilaa, M. P., Palaciob, L., Martínezb, F., . . . Hernández, A. (2006). Effect of phosphoric and hydrofluoric acid on the charge density of a nanofiltration membrane. . In *Desalination*. .
- Gregg, S. J. (1967). Adsorption, Surface Area and Porosity. Londres, England : Academic Press.
- Guastalli, A., Parrilla, R., Llorens, J., & Mata, J. (2004). Application of Electrodialysis on Recovering Phosphoric Acid From an Industrial Rinsewater.
- Guha, H. S. (2001). Chromium transport oxidation, and adsorption in manganese-coated sand. J. . In *Contam. Hydrol*.
- Hernández, J., & Riera, B. . (2014). Mejorador de suelo a partir de una zeolita natural: Una propuesta sustentable para la agricultura. *SciELO*.
- Hua, R., & Li, Z. (2014). Sulfhydryl functionalized hydrogel with magnetism: Synthesis, characterization, and adsorption behavior study for heavy metal removal. In *Chemical Engineering Journal*. .
- Ibrahim, K. T.-D. (2002). Use of natural chabazite-Phillipsite tuff in wastewater treatment from electroplantin facies in Jordan. In *Environmental Geology*.
- Inglezakis, V. M. (2002). Equilibrium and kinetic ion exchange studies of Pb⁺², Cr⁺³, Fe⁺³ and Cu⁺² on natural clinoptilolite. In *Water Research*.

- Jaynes, W. &. (1991). Hydrophobicity of siloxanes surfaces in smectites as revealed by aromatic hydrocarbon adsorption from water. In *Clays and Clay Miner.*
- Jaynes, W. &. (1996). BTEX sorption by organoclays: cosorptive enhancement and equivalence of interlayer complexes. In *Soil Sci. Soc. Amer.*
- Kanematsu, M. Y. (2013). Arsenic (III, V) adsorption on a goethite-based adsorbent in the presence of major co-existing ions: Modeling competitive adsorption consistent with spectroscopic and molecular evidence. . In *Geochim. Cosmochim. .*
- Karnib, M., Kabbani, A., Holail, H., & Olama, Z. (2014). Heavy Metals Removal Using Activated Carbon, Silica and Silica Activated Carbon Composite. In *Energy Procedia .*
- Keiluweit, M. P. (2010). Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). In *Environ. Sci.Technol. .*
- Komarket. (2014, marzo 26). *komarket.com*. Retrieved from www.komarket.com/articles
- Kumpiene, J. L. (2008). Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments ± A review. . In *Waste Manag.*
- Lagaly, G. (1994). Bentonites: adsorbent of toxic substances. . In *Prog. Colloid Polym. Sci.*
- Lagaly, G. (2001). Pesticide–clay interactions and formulations. In *Appl. Clay Sci.*
- Larney, F. A. (2012). The role of organic amendments in soil reclamation: A review. In *Can. J. Soil Sci.*
- Lazaridis, N. E. (2004). Copper removal from effluents by various separation techniques. . In *Hydrometallurgy.*
- Lehmann, J. (2007). A handful of carbon.
- Lehmann, J. (2011). Biochar effect effects on soil biota - A review.

- Lima, I. B. (2010). Physicochemical and adsorptive properties of fast-pyrolysis biochars and their steam activated counterparts. . In *J. Chem. Technol. Biotechnol.*
- Liu, X., & Lee, D. (2014). Thermodynamic parameters for adsorption equilibrium of heavy metals and dyes from wastewaters . In *Bioresource Technology*.
- LLC, B. I. (2019). *Bepex.com*. Retrieved from <https://www.bepex.com/industries/mineral/>
- Lloréns, M. P. (s.f). Tratamiento de aguas residuales mediante un sistema de percolación híbrido.
- López. (2003). *Porta*. Retrieved from Edafología .
- Louzidou, M. K. (1992). Natural zeolites and their ion exchange behavior towards chromium. In *Journal of Environmental Science and Health*.
- Lu, H. W. (2012). Relative distribution of Pb²⁺ sorption mechanisms by sludge-derived biochar. . In *Water Res.*
- Luz, A. B. (1994). Zeólitas: Propriedades e Usos Industriais. In *CETEM Centro de Tecnologia Mineral*.
- M Mestanza. (2012). Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes . In *Tesis de doctorado, Universidad complutense de Madrid* . Madrid .
- M. Alcalá de Jesús, C. H. (2009). Mineralogía y retención y fosfatos en andisoles . In *Terra latinoamericana* .
- M. Galimberti. (2011). Rubber-Clay Nanocomposites. .
- M. Moreno, G. G.-T. (2006). Bentonita modificada por intercalación de surfactantes neutros y cationicos . In *CONAMET/SAM*. Buenos Aires .
- M., P. (1997). Natural zeolites as cation exchanger for environment protection.

- Madeira, A. d. (2012). Tomato and parsley growth, arsenic uptake and translocation in a contaminated amended soil. . In *Geochem. Explor.*
- Manuel Olmo, R. V. (2016, febrero). 'Changes in soil nutrient availability explain biochar's impact on wheat root development', *Plant and Soil.* .
- Marcos, F., & Camps, M. (2002). Biocombustibles Sólidos Densificados. Madrid: Mundi-prensa.
- Matis, K. A. (2004). Application of flotation for the separation of metal-loaded zeolites. In *Chemosphere.*
- Melamed. (2006). Efficiency of industrial minerals on the removal of mercury species from liquid effluents.
- Mortland, M. (1970). Clay-organic complexes and interactions. In *Adv. Agron.*
- Mudho, A. &. (2013). Effects of heavy metals as stress factors on anaerobic digestion processes and biogas production from biomass. In *Int. J. Environ Sci. Technol.*
- Mumpton, F. (1999). *La roca mágica: Uses of natural zeolite in agricultura and industry.* Retrieved from National Academy Of Science.
- Nemerow, N., & Dasgupta, A. (2008). Tratamiento de Vertidos Industriales Peligrosos. Madrid.
- Ören, A. y. (2006). Factors affecting adsorption characteristics of Zn²⁺ on two natural zeolites. In *Journal of Hazardous Materials.*
- Ortiz, L. (2008). Producción de biocombustibles sólidos de alta densidad en España.
- Osei Boamah, P., Huang, Y., Hua, M., Zhang, Q., Wu, J., Onumah, J., . . . Osei Boamah, P. (2015). Sorption of heavy metal ions onto carboxylate chitosan derivatives. In *Ecotoxicology and Environmental Safety.*
- Otero-Fariña, A. F. (2017). Effects of natural organic matter on the binding of arsenate and copper onto goethite. . In *Chem. Geol.*

- Pansini, M. y. (1991). Optimization of process of Cr³⁺ removal from wastewater by direct addition of natural zeolites. . In *Proc. I Convegno Naz. di Scienza e Tecnologia delle zeoliti*. Napoli .
- PEP. (2003). Renewable Bioenergy . In R. a. PEP (Professional Engineering Publishers): “Renewable Bioenergy - Technologies.
- Pérez-López, R. C. (2009). Attenuation of pyrite oxidation with a fly ash pre-barrier: Reactive transport modelling of column experiments. In *Appl. Geochem.*
- Piedrahita, O. (2011). CAPACIDAD DE INTERCAMBIO.
- Pinilla., A. R. (2014). *El biobio-carbón y su aplicación en suelos contaminados*. Retrieved from r3 Environmental Technology Colombia SAS:
<http://www.r3environmental.com.co/noticias/71-el-biocarb%C3%B3n-y-su-aplicaci%C3%B3n-en-suelos-contaminados.html>
- Polat, H., & Erdogan, D. (2007). Heavy metal removal from waste waters by ion flotation. In *Journal of Hazardous Materials*. .
- Ramos, D. C. (2018). Adsorción de Cadmio, Cobre y Plomo en Bentonita, Caolín y Zeolita Naturales y Modificadas: Una Revisión de los Parámetros de Operación, Isotermas y Cinética. Lima.
- Ramos, D. C. (2018). Adsorción de Cadmio, Cobre y Plomo en Bentonita, Caolín y Zeolita Naturales y Modificadas: Una Revisión de los Parametros de Operación, Isotermas y Cinética. In *Escuela de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Ingeniería*.
- Ramos, M. J. (2010). Análisis de la modificación orgánica de las arcillas laminares .
- Restrepo, J. (1996). Abonos orgánicos fermentados. In K. Radicke, *experiencias de agricultores en Centroamérica y Brasil*.
- Riegelhaupt, E. (2014). Curso Biocombustibles Sólidos .
- Rodríguez, F. G. (2000). Eliminación de Metales Tóxicos Mediante Zeolitas Naturales.

- Romero, E. G. (2001). *Las arcillas: propiedades y usos*. . Retrieved from <http://campus.usal.es/~delcien/doc/GA.PDF>
- Rubio, D. I., R. A Muñoz, C., A. Perdomo, G., & D, R. A. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales.
- Santos, E. A. (2009). Trace elements and activity of antioxidative enzymes in *Cistus ladanifer* L. growing on an abandoned mine area. In *Ecotoxicology*.
- Schmitt, D. H. (2002). Influence of natural organic matter on the adsorption of metal ions onto clay minerals. . In *Environ. Sci. Technol.*
- Sheng, G. S. (1999). A dual functional organoclay sorbent for lead and chlorobenzene. In *Soil Sci. Soc. Am. J.*
- Siantar, D. B. (1994). Interactions between organic and inorganic pollutants in the clay interlayer. In *Clays Clay Min.*
- Sing, K. D. (1985). Reporting Physisorption for gas/solid systems.
- Sparks, D. (2003). Environmental Soil Chemistry. . In *Academic Press*. San Diego .
- Stadler. (1993).
- Stamatakis, M., Koukouzas, C., Vassilatos, E., & Kamenou, a. K. (2001). The zeolites from Evros Region, Northern Greece: A potential use as cultivation substrate in hydroponics. *Acta Horticulturae*.
- Suárez., E. G. (2001). *Las arcillas: Propiedades y usos* .
- Sucasaire, P. (2018). Nivel de conocimiento de los alumnos de la Universidad Nacional del Altiplano-Puno respecto a los tipos de metales pesados que contaminan el medio ambiente .
- Tan, X. L. (2015). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. . In *Chemosphere*.

- Taylor, J., & Wiesner, M. (2002). Calidad y Tratamiento del Agua. In *Manual de suministros de agua comunitaria* .
- Tejada, C. V. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico.
- Tipping, E. (2002). Cation Binding by Humic Substances. . In *Cambridge University Press*.
- Tong, S. L. (2011). Adsorption of Cu(II) by biochars generated from three crop straws. . In *Chem. Eng. J.*
- Tsitsishvili G. V.; Kirov G. N.; Filizova L. D. (1992). *Natural zeolites* . Retrieved from New York. Ellis Horwood.
- Turan, M. U. (2005). Lead removal in fixed-bed columns by Zeolite and sepiolite. In *Chemosphere*.
- Ulloa, J. (1996). El tratamiento de las aguas residuales. Necesidades, objetivos y sistemas. . In *Curso sobre reutilización de aguas residuales y salinas en regadíos: aplicación de tecnologías avanzadas*. Madrid.
- Vaca, M. M. (2001). Heavy metal removal with Mexican clinoptilolite: multi-component ionic exchange. In *Water Research*.
- Valladares, A. (2008). Diseño practico de un molino de bolas . Mexico .
- Wan Ngah, W., Teong, L., & Hanafiah, M. (2011). Adsorption of dyes and heavy metal ions by chitosan composites: A review. In *Carbohydrate Polymers*.
- Wang, F. X. (2016). Sorption of polychlorinated biphenyls onto biochars derived from corn straw and the effect of propranolol. . In *Bioresource Technol.*
- Wang, J., & Chen, C. (2009). Biosorbents for heavy metals removal and their future. In *B. Advances*.
- White, W. 2. (2013b). Geochemistry. In *Wiley-Blackwell Chichester*.

- Wong, M. (2003). Ecological restoration of mine degraded soils with emphasis on metal contaminated soils. . In *Chemosphere*.
- Z. Husain, Z. Z. (2002). Briquetting of palm and Shell from the processing of palm nuts to palm oil. In *Biomass and bioenergy*.
- Zamboulis, D. S. (2004). The application of sorptive flotation for the removal of metal ions. . In *Desalination*.
- Zamzow, M. B. (1990). Removal of heavy metal and other cations from wastewater using zeolites. In *Separation Science and Tecnology*.
- Zanuzzi, J. A. (2009). Amendments with organic and industrial wastes stimulate soil formation in mine tailings as revealed by micromorphology. . In *Geoderma*.
- Zewail, T., & Yousef, N. (2015). Kinetic study of heavy metal ions removal by ion exchange in batch conical air spouted bed. In *Alexandria Engineering Journal*.
- Zhang, X. H. (2013). Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants. In *Environ. Sci. Pollut. Res.*

ANEXOS

Anexo 1: Dosificación y homogenización muestra 2



Anexo 2: Dosificación y homogenización muestra 3



Anexo 3: Dosificación y homogenización muestra 4



Anexo 4: Dosificación y homogenización muestra 5



Anexo 5: Dosificación y homogenización muestra 6



Anexo 6: Dosificación y homogenización muestra 7



Anexo 7: Dosificación y homogenización muestra 8



Anexo 8: Dosificación y homogenización muestra 9



Anexo 9: Prueba de friabilidad Muestra 9



Anexo 10: Prueba de friabilidad Muestra 8



Anexo 11: Prueba de friabilidad Muestra 7



Anexo 12: Prueba de friabilidad Muestra 6



Anexo 13: Prueba de friabilidad Muestra 5



Anexo 14: Prueba de friabilidad Muestra 4



Anexo 15: Prueba de friabilidad Muestra 3



Anexo 16: Prueba de friabilidad Muestra 2



Anexo 17: Prueba de friabilidad Muestra 1



Anexo 18: Análisis pellets



Anexo 19: Análisis pellets

	Muestra 1.1		Muestra 1.2		Muestra 2.1		Muestra 2.2		Muestra 3.1		Muestra 3.2		Muestra 4.1		Muestra 4.2		Muestra 5.1		Muestra 5.2	
	Tamaño (mm)	Peso (g)																		
1	15	2,3	15	2,3	10	1,5	15	1,98	15	2,15	13	2	10	1,5	10	1,3	15	2,5	15	2
2	15	2,3	15	2,3	15	2	15	1,98	15	2,15	13	2	10	1,5	10	1,3	12	1,8	15	2
3	15	2,3	15	2,3	17	2,07	15	1,98	15	2,15	10	1,5	12	1,6	12	1,4	12	1,8	15	2
4	15	2,3	15	2,3	18	2,07	15	1,98	15	2,15	10	1,5	12	1,6	10	1,3	10	1,6	10	1,8
5	20	2,9	15	2,3	16	2,07	15	1,98	15	2,15	10	1,5	12	1,6	10	1,3	15	2,5	10	1,8
6	20	2,9	15	2,3	17	2,07	15	1,98	15	2,15	10	1,5	12	1,6	8	1,2	15	2,5	10	1,8
7	15	2,3	15	2,3	10	1,5	15	1,98	15	2,15	10	1,5	12	1,6	10	1,3	15	2,5	10	1,8
8	15	2,3	15	2,3	10	1,5	15	1,98	15	2,15	10	1,5	12	1,6	8	1,2	10	1,6	12	1,9
9	20	2,9	15	2,3	10	1,5	15	1,98	15	2,15	10	1,5	10	1,5	10	1,3	10	1,6	12	1,9
10	20	2,9	15	2,3	10	1,5	12	1,2	15	2,15	10	1,5	10	1,5	8	1,2	12	1,8	10	1,8
11	15	2,3	15	2,3	14	1,9	12	1,2	15	2,15	10	1,5	7	1,4	8	1,2	10	1,6	10	1,8
12	15	2,3	15	2,3	10	1,5	12	1,2	15	2,15	10	1,5	8	1,4	13	1,3	12	1,8	8	1,6
13	15	2,3	15	2,3	10	1,5	12	1,2	15	2,15	10	1,5	8	1,4	10	1,3	15	2,5	10	1,8
14	15	2,3	15	2,3	10	1,5	10	1,13	15	2,15	13	2	10	1,5	8	1,2	12	1,8	10	1,8
15	15	2,3	12	1,5	10	1,5	10	1,13	13	1,53	13	2	10	1,5	8	1,2	15	2,5	10	1,8
16	15	2,3	12	1,5	15	2	10	1,13	13	1,53	13	2	15	2,25	8	1,2	12	1,8	10	1,8
17	15	2,3	15	2,3	15	2	10	1,13	10	1,53	13	2	10	1,5	8	1,2	8	1,4	10	1,8
18	15	2,3	15	2,3	15	2	10	1,13	10	1,53	13	2	10	1,5	8	1,2	10	1,6	10	1,8
19	15	2,3	12	1,5	10	1,5	10	1,13	10	1,53	13	2	10	1,5	8	1,2	15	2,5	10	1,8
20	15	2,3	10	1,3	15	2	10	1,13	10	1,53	10	1,5	10	1,5	8	1,2	10	1,6	10	1,8
21	15	2,3	13	1,5	10	1,5	10	1,13	10	1,53	5	1	15	2,25	8	1,2	15	2,5	10	1,8
22	15	2,3	13	1,5	10	1,5	10	1,13	10	1,53	5	1	15	2,25	10	1,3	15	2,5	10	1,8
23	15	2,3	12	1,5	10	1,5	10	1,13	10	1,53	7	1	10	1,5	10	1,3	15	2,5	10	1,8
24	15	2,3	12	1,5	15	2	10	1,13	10	1,53	7	1	10	1,5	10	1,3	20	2,9	10	1,8
25	18	2,8	12	1,5	15	2	10	1,13	10	1,53	8	1	10	1,5	10	1,3	15	2,5	10	1,8
26	19	2,9	12	1,5	15	2	10	1,13	10	1,53	8	1	15	2,25	10	1,3	10	1,6	10	1,8
27	20	2,9	12	1,5	15	2	10	1,13	10	1,53	10	1,5	15	2,25	8	1,2	12	1,8	10	1,8
28	19	2,9	10	1,3	10	1,5	10	1,13	10	1,53	13	2	15	2,25	10	1,3	10	1,6	10	1,8

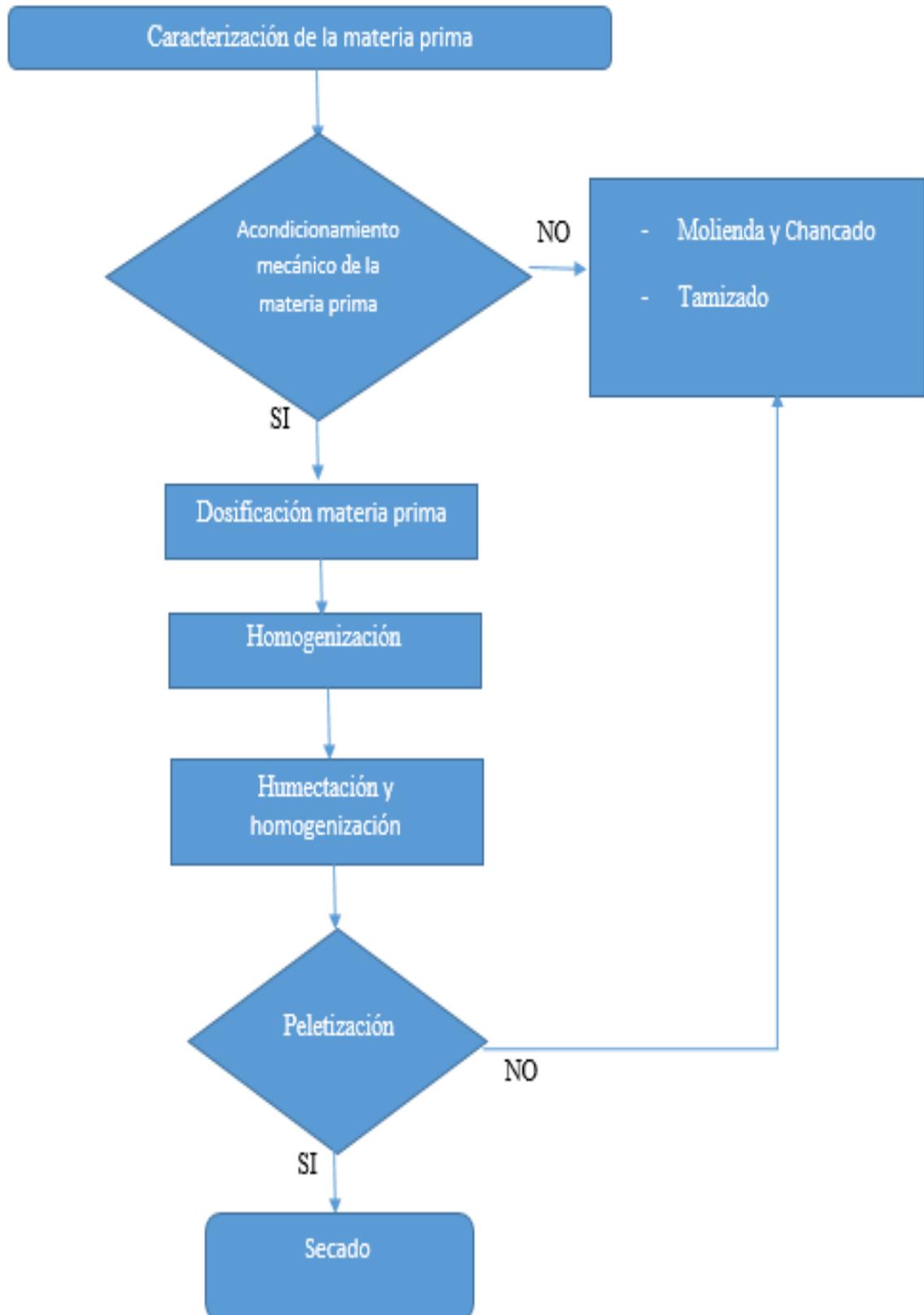
Anexo 20: Análisis pellets

Muestra 6.1		Muestra 6.2		Muestra 7.1		Muestra 7.2		Muestra 8.1		Muestra 8.2		Muestra 9.1		Muestra 9.2	
Tamaño (mm)	Peso (g)														
17	2,7	17	2,6	8	1,7	15	2,6	10	2	10	2,1	10	2,3	9	2,1
17	2,7	17	2,6	10	1,8	12	2,3	8	1,8	8	1,9	10	2,3	9	2,1
16	2,6	15	2,4	10	1,8	15	2,6	10	2	10	2,1	13	2,78	10	2,3
15	2,5	15	2,4	10	1,8	15	2,6	10	2	10	2,1	8	1,9	10	2,3
15	2,5	15	2,4	10	1,8	12	2,3	10	2	10	2,1	10	2,3	9	2,1
15	2,5	12	2,1	10	1,8	15	2,6	10	2	10	2,1	10	2,3	9	2,1
16	2,6	10	1,8	10	1,8	12	2,3	8	1,8	10	2,1	12	2,57	9	2,1
14	2,4	10	1,8	10	1,8	13	2,4	8	1,8	10	2,1	12	2,57	10	2,3
14	2,4	10	1,8	12	2,1	13	2,4	10	2	10	2,1	10	2,3	10	2,3
14	2,4	10	1,8	10	1,8	10	1,8	10	2	10	2,1	10	2,3	8	1,9
14	2,4	10	1,8	10	1,8	12	2,3	13	2,6	10	2,1	10	2,3	12	2,5
15	2,5	10	1,8	12	2,1	12	2,3	13	2,6	8	1,9	10	2,3	8	1,9
12	2,2	10	1,8	10	1,8	13	2,4	10	2	10	2,1	10	2,3	10	2,2
15	2,5	10	1,8	10	1,8	13	2,4	10	2	8	1,9	12	2,57	7	1,7
15	2,5	10	1,8	10	1,8	12	2,3	8	1,8	9	2	10	2,3	8	1,9
13	2,3	10	1,8	10	1,8	15	1,5	10	2	9	2	10	2,3	8	1,9
15	2,5	10	1,8	10	1,8	15	1,5	10	2	8	1,9	12	2,57	8	1,9
17	2,7	12	2,1	10	1,8	10	1,8	10	2	8	1,9	12	2,57	12	2,5
17	2,7	12	2,1	10	1,8	8	1,5	10	2	8	1,9	10	2,3	10	2,2
12	2,2	10	1,8	10	1,8	8	1,5	10	2	8	1,9	12	2,57	9	2
15	2,5	7	1,6	10	1,8	13	2,4	8	1,8	8	1,9	12	2,57	9	2
12	2,2	15	2,4	10	1,8	13	2,4	10	2	10	2,1	12	2,57	9	2
10	2	13	2,2	8	1,7	12	2,3	10	2	9	2	10	2,3	9	2
12	2,2	17	2,6	10	1,8	12	2,3	10	2	9	2	10	2,3	13	2,7
15	2,5	17	2,6	10	1,8	10	1,8	10	2	9	2	12	2,57	12	2,5
15	2,5	15	2,4	10	1,8	10	1,8	10	2	8	1,9	15	3,2	10	2,2
13	2,3	15	2,4	8	1,7	10	1,8	10	2	8	1,9	12	2,57	8	1,9
15	2,5	15	2,4	8	1,7	12	2,3	8	1,8	10	2,1	12	2,57	10	2,2

Anexo 21: Matriz pellets



Anexo 22: Flujograma del proceso de peletizado



Anexo 23: Análisis de CIC muestra 1

INIAPI INSTITUTO NACIONAL AUTÓNOMO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS
ESTACIÓN EXPERIMENTAL DEL AZUAYO

REPORTE DE ANALISIS DE SUELOS

No Muestra Laboratorio:	6355	DATOS GENERALES DE LA MUESTRA			MUESTRA / CÓDIGO	3.2
Propietario:	Kevin Fernández			Sector / Finca	Parroquia	Provincia
Fecha entrega de resultados:	13/02/2020	Ubicación:		---	Tarqui	CUENCA
RESULTADOS		Cultivador: ninguno				

p.H.	---	Nty. Ácido [p < 5]	Ácido [5-15]	Medio. Ácido [15-20]	Urganos. Ácido [20-55]	Pédo. Neutro [55-75]	Urganos. Alkalino [75-85]	Medio. Alkalino [85-95]	Alcalino [95-100]
Clase Textural (% arena, % arcilla, % limo)	---	---							
Materia Orgánica %	---	---							

ANALISIS DE CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

Miliéquivalentes / 100 g. de suelo				Suma de Bases	% Saturación de Bases	CIC
K	Ca	Mg	Na	Meq / 100 g. de suelo	SATURADO	Meq / 100 g. de suelo
8.37	64.15	3.14	23.10	89.84		56.01




LABORATORISTA

Anexo 24: Análisis de CIC muestra 3

INIAPI INSTITUTO NACIONAL AUTÓNOMO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS
ESTACIÓN EXPERIMENTAL DEL AZUAYO

REPORTE DE ANALISIS DE SUELOS

No Muestra Laboratorio:	6356	DATOS GENERALES DE LA MUESTRA			MUESTRA / CÓDIGO	3.2
Propietario:	Kevin Fernández			Sector / Finca	Parroquia	Provincia
Fecha entrega de resultados:	13/02/2020	Ubicación:		---	Tarqui	CUENCA
RESULTADOS		Cultivador: ninguno				

p.H.	---	Nty. Ácido [p < 5]	Ácido [5-15]	Medio. Ácido [15-20]	Urganos. Ácido [20-55]	Pédo. Neutro [55-75]	Urganos. Alkalino [75-85]	Medio. Alkalino [85-95]	Alcalino [95-100]
Clase Textural (% arena, % arcilla, % limo)	---	---							
Materia Orgánica %	---	---							

ANALISIS DE CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

Miliéquivalentes / 100 g. de suelo				Suma de Bases	% Saturación de Bases	CIC
K	Ca	Mg	Na	Meq / 100 g. de suelo	SATURADO	Meq / 100 g. de suelo
8.22	68.30	4.87	27.99	109.18		66.85




LABORATORISTA

Anexo 25: Análisis de CIC muestra 5

INIAPI INSTITUTO NACIONAL AUTÓNOMO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS
ESTACIÓN EXPERIMENTAL DEL AZUAYO

REPORTE DE ANALISIS DE SUELOS

N° Muestra Laboratorio:	6357	DATOS GENERALES DE LA MUESTRA				MUESTRA / CÓDIGO	5.2
Propietario:	Kevin Fernández	Ubicación:	Sector / Finca	Parroquia	Cantón	Provincia	
Fecha entrega de resultados:	13/02/2020		---	Tangulí	CUENCA	Azuay	
RESULTADOS		Cultivo/Uso: ninguno					

p.H.	---	Muy Ácido (p < 5)	Ácido (5-6)	Neutro (6-7)	Ligeramente Ácido (7-8)	Poco Neutro (8-9)	Ligeramente Alcalino (9-10)	Moderadamente Alcalino (> 10)	Alcalino (> 14)
Clase Textural (% arena, % arcilla, % limo)	---	---							
Materia Orgánica: %	---	---							

ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

Miliequivalentes / 100 g. de suelo				Suma de Bases	% Saturación de Bases	CIC
K	Ca	Mg	Na	Meq / 100 g. de suelo	SATURADO	Meq / 100 g. de suelo
5.02	49.90	5.24	33.80	93.96		

INSTITUTO NACIONAL AUTÓNOMO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS
ESTACIÓN EXPERIMENTAL DEL AZUAYO

LABORATORISTA

Anexo 26: Análisis de CIC muestra 9

INIAPI INSTITUTO NACIONAL AUTÓNOMO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS
ESTACIÓN EXPERIMENTAL DEL AZUAYO

REPORTE DE ANALISIS DE SUELOS

N° Muestra Laboratorio:	6358	DATOS GENERALES DE LA MUESTRA				MUESTRA / CÓDIGO	9.2
Propietario:	Kevin Fernández	Ubicación:	Sector / Finca	Parroquia	Cantón	Provincia	
Fecha entrega de resultados:	13/02/2020		---	Tangulí	CUENCA	Azuay	
RESULTADOS		Cultivo/Uso: ninguno					

p.H.	---	Muy Ácido (p < 5)	Ácido (5-6)	Neutro (6-7)	Ligeramente Ácido (7-8)	Poco Neutro (8-9)	Ligeramente Alcalino (9-10)	Moderadamente Alcalino (> 10)	Alcalino (> 14)
Clase Textural (% arena, % arcilla, % limo)	---	---							
Materia Orgánica: %	---	---							

ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

Miliequivalentes / 100 g. de suelo				Suma de Bases	% Saturación de Bases	CIC
K	Ca	Mg	Na	Meq / 100 g. de suelo	SATURADO	Meq / 100 g. de suelo
2.15	47.05	8.20	48.16	105.56		

INSTITUTO NACIONAL AUTÓNOMO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS
ESTACIÓN EXPERIMENTAL DEL AZUAYO

LABORATORISTA