



**UNIVERSIDAD TÉCNICA AMBATO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**PROYECTO TÉCNICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERA CIVIL**

**TEMA:**

---

**“DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE  
SUSTANCIAS REACTIVAS: PIROCLASTOS VOLCÁNICOS,  
ZEOLITA CLINOPTILOLITA, ZEOLITA MODERNITA, DE ORIGEN  
ECUATORIANO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA.”**

---

**Autora:** Ana María Amaya Díaz

**Tutor:** Ing. Mg. Fabián Rodrigo Morales Fiallos

**AMBATO - ECUADOR**

**Abril – 2021**

## CERTIFICACIÓN

En mi calidad de Tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención del título de Ingeniera Civil, con el tema: **“DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE SUSTANCIAS REACTIVAS: PIROCLASTOS VOLCÁNICOS, ZEOLITA CLINOPTILOLITA, ZEOLITA MODERNITA, DE ORIGEN ECUATORIANO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA.”**, elaborado por la Srta. **Ana María Amaya Díaz**, portadora de la cédula de ciudadanía: C.I. 180320541-6, estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Esta concluido en su totalidad.

Ambato, Marzo 2021

---

**Ing. Mg. Fabián Rodrigo Morales Fiallos**  
**TUTOR**

## AUTORÍA DE LA INVESTIGACION

Yo, **Ana María Amaya Díaz**, con C.I. 180320541-6 declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente trabajo experimental con el tema **“DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE SUSTANCIAS REACTIVAS: PIROCLASTOS VOLCÁNICOS, ZEOLITA CLINOPTILOLITA, ZEOLITA MODERNITA, DE ORIGEN ECUATORIANO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA.”**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autora del proyecto, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, Marzo 2021



---

**Ana María Amaya Díaz**

**C.I: 180320541-6**

**AUTOR**

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo Experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, Marzo 2021



---

**Ana María Amaya Díaz**

**C.I: 180320541-6**

**AUTOR**

## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO**

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental, realizado por la estudiante Ana María Amaya Díaz de la Carrera de Ingeniería Civil bajo el tema: **DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE SUSTANCIAS REACTIVAS: PIROCLASTOS VOLCÁNICOS, ZEOLITA CLINOPTILOLITA, ZEOLITA MODERNITA, DE ORIGEN ECUATORIANO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA.**

Ambato, Marzo 2021

Para constancia firman:

---

Ing. Celia Margarita Mayacela Rojas Ph.D  
**Miembro Calificador**

---

Ing. Mg. Carlos Patricio Navarro Peñaherrera  
**Miembro Calificador**

## **DEDICATORIA**

A Dios, que me ha permitido ser una mujer esforzada y valiente, brindándome la dicha de rodearme de personas que han sido de bendición.

A mis padres, que siempre estuvieron presentes apoyándome en todo momento para cumplir con cada una de mis metas, por sus sacrificios para brindarme una excelente educación.

A mi hermana, por ser parte ese pilar fundamental e importante en vida, que siempre estuvo brindándome ánimo y apoyo cada día y hacer realidad todos mis sueños.

A mi novio, quién se convirtió en una de las personas más importante de mi vida, gracias a su apoyo incondicional y desinteresado he alcanzado las metas que me he propuesto.

**Ana María Amaya Díaz**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a la Universidad Técnica de Ambato, a la facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, en especial a los docentes de la Carrera de Ingeniería Civil por cada una de sus enseñanzas compartidas durante toda mi carrera universitaria.

Al mi tutor Ing. Mg. Fabián Morales Fiallos quién con su ayuda y apoyo incondicional se culminó la elaboración del presente proyecto.

Al Ing. Lenin Maldonado por brindarme su valiosa colaboración, tiempo y orientación en el desarrollo de este trabajo experimental.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|   |      |
|---|------|
| CERTIFICACIÓN .....   | ii   |
| AUTORÍA DE LA INVESTIGACION.....                              | iii  |
| DERECHOS DE AUTOR.....  | iv   |
| APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....                         | v    |
| DEDICATORIA.....  | vi   |
| AGRADECIMIENTO .....  | vii  |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS.....                                     | viii |
| ÍNDICE DE TABLAS .....  | x    |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....  | xii  |
| RESUMEN.....  | xiv  |
| ABSTRACT .....  | xv   |
| 1. CAPITULO I.- MARCO TEÓRICO .....                           | 1    |
| 1.1 Antecedentes Investigativos .....                         | 1    |
| 1.1.1 Antecedentes .....                                      | 1    |
| 1.1.2 Justificación.....                                      | 3    |
| 1.1.3 Fundamentación Teórica.....                             | 7    |
| 1.1.4 Hipótesis.....  | 34   |
| 2. CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA .....                            | 35   |
| 2.1 Descripción de la Metodología.....                        | 35   |
| 2.2 Materiales y Equipos .....                                | 35   |
| 2.1.1 Sustancias Reactivas.....                               | 36   |
| 2.1.2 Instrumentos, Equipos y Materiales de Laboratorio ..... | 38   |
| 2.2 Métodos .....   | 51   |

|   |     |
|---|-----|
| 2.2.1 Plan de Recolección de Datos .....  | 51  |
| 2.2.2 Plan de Procesamiento y Análisis de Información.....                              | 56  |
| 3. CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....  | 80  |
| 3.1 Análisis y discusión de los resultados .....  | 80  |
| 3.2 Verificación de Hipótesis .....   | 110 |
| 4. CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                                   | 112 |
| 4.1 Conclusiones .....  | 112 |
| 4.2 Recomendaciones.....  | 115 |
| 5. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA .....   | 116 |
| 6. ANEXOS .....   | 122 |
| 6.1 IMÁGENES 3D PERMEÁMETRO CARGA VARIABLE .....  | 122 |
| 6.2 PLANOS PEAMEÁMETRO CARGA CONSTANTE .....  | 123 |
| 6.3 FOTOGRAFÍAS OBTENIDAS DEL MICROSCOPIO DE BARRIDO<br>DE CADA SUSTANCIA REACTIVA..... | 128 |
| 6.3.1 PIROCLASTO VOLCÁNICO.....   | 128 |
| 6.4.1 ZEOLITA CLINOPTILOLITA .....  | 130 |
| 6.5.1 ZEOLITA MORDENITA.....  | 132 |
| 6.4 FICHA TÉCNICA SUSTANCIA REACTIVA.....   | 134 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 1. Caracterización de la Velocidad de Filtración .....                       | 8   |
| Tabla 2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) .....                 | 11  |
| Tabla 3. Clasificación de la Porosidad.....  | 14  |
| Tabla 4. Permeámetro Carga Constante VS Permeámetro Carga Variable .....           | 20  |
| Tabla 5. Características y Clasificación del Piroclástico Volcánico .....          | 26  |
| Tabla 6. Clasificación Granulométrica .....  | 27  |
| Tabla 7. Procesos y Productos Volcánicos.....                                      | 29  |
| Tabla 8. Zeolitas Naturales como Adsorbente .....                                  | 32  |
| Tabla 9. Granulometría Piroclasto Volcánico .....                                  | 80  |
| Tabla 10. Características y propiedades del Piroclasto Volcánico .....             | 81  |
| Tabla 11. Coeficiente de Permeabilidad del Piroclasto Volcánico .....              | 82  |
| Tabla 12. Permeabilidad Relativa Piroclasto Volcánico.....                         | 82  |
| Tabla 13. Gravedad Específica del Piroclasto Volcánico .....                       | 83  |
| Tabla 14. Peso Unitario y Coeficiente de Compacidad del Piroclasto Volcánico ..... | 83  |
| Tabla 15. Compacidad Relativa del Piroclasto Volcánico.....                        | 84  |
| Tabla 16. Diámetro promedio del Piroclasto Volcánico.....                          | 86  |
| Tabla 17. Esfericidad Promedio del Piroclasto Volcánico.....                       | 88  |
| Tabla 18. Criterios y valores de Esfericidad .....                                 | 89  |
| Tabla 19. Granulometría Zeolita Clinoptilolita.....                                | 90  |
| Tabla 20. Características y propiedades de la Zeolita Clinoptilolita.....          | 91  |
| Tabla 21. Coeficiente de Permeabilidad de la Zeolita Clinoptilolita.....           | 92  |
| Tabla 22. Permeabilidad Relativa Zeolita Clinoptilolita .....                      | 92  |
| Tabla 23. Gravedad Específica Zeolita Clinoptilolita .....                         | 93  |
| Tabla 24. Peso Unitario y Coeficiente de Compacidad Zeolita Clinoptilolita.....    | 93  |
| Tabla 25. Compacidad Relativa de la Zeolita Clinoptilolita .....                   | 94  |
| Tabla 26. Diámetro promedio de la Zeolita Clinoptilolita.....                      | 96  |
| Tabla 27. Esfericidad Promedio Zeolita Clinoptilolita .....                        | 98  |
| Tabla 28. Criterios y valores de Esfericidad .....                                 | 99  |
| Tabla 29. Granulometría Zeolita Mordenita .....                                    | 100 |
| Tabla 30. Características y propiedades de la Zeolita Mordenita .....              | 101 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 31. Coeficiente de Permeabilidad de la Zeolita Mordenita .....              | 102 |
| Tabla 32. Permeabilidad Relativa Zeolita Mordenita .....                          | 102 |
| Tabla 33. Gravedad Específica Zeolita Mordenita .....                             | 103 |
| Tabla 34. Peso Unitario y Coeficiente de Compacidad de la Zeolita Mordenita ..... | 103 |
| Tabla 35. Compacidad Relativa de la Zeolita Mordenita .....                       | 104 |
| Tabla 36. Diámetro promedio de poros de la Zeolita Mordenita .....                | 106 |
| Tabla 37. Esfericidad Promedio de la Zeolita Mordenita .....                      | 108 |
| Tabla 38. Criterios y valores de Esfericidad .....                                | 109 |
| Tabla 39. Resultados Sustancias Reactivas .....                                   | 110 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Esquema Filtro.....                                     | 7  |
| Figura 2.Remoción de Contaminantes (Proceso Mecánico) .....       | 8  |
| Figura 3.Proceso de Absorción.....                                | 9  |
| Figura 4.Proceso de Adsorción.....                                | 10 |
| Figura 5.Representación del espacio poroso de partículas.....     | 13 |
| Figura 6.Escala pH.....   | 17 |
| Figura 7.Permeámetro de Carga Constante.....                      | 18 |
| Figura 8.Permeámetro de Carga Variable .....                      | 19 |
| Figura 9. Diseño 3D del Permeámetro de Carga Constante.....       | 21 |
| Figura 10. Escala Piezométrica .....                              | 22 |
| Figura 11. Cilindros .....  | 23 |
| Figura 12. Base Permeámetro.....                                  | 23 |
| Figura 13. Tanque de Carga Constante .....                        | 24 |
| Figura 14.Composición Vidrio.....                                 | 27 |
| Figura 15.Composición Cristales .....                             | 28 |
| Figura 16.Principales fenómenos magmáticos.....                   | 29 |
| Figura 17.Estructura Zeolita.....                                 | 31 |
| Figura 18.Estructura Zeolita Clinoptilolita .....                 | 33 |
| Figura 19.Estructura Zeolita Mordenita.....                       | 33 |
| Figura 20. Fotografía Piroclasto Volcánico .....                  | 56 |
| Figura 21. Fotografía Zeolita Clinoptilolita .....                | 64 |
| Figura 22. Fotografía Zeolita Mordenita .....                     | 72 |
| Figura 23. Fotografía Clemex Vision del Piroclasto Volcánico..... | 85 |
| Figura 24. Tabla Clemex Vision del Piroclasto Volcánico.....      | 85 |
| Figura 25. Fotografía diámetro del Piroclasto Volcánico .....     | 86 |
| Figura 26. Esfericidad Piroclasto Volcánico, muestra 1 .....      | 87 |
| Figura 27. Esfericidad Piroclasto Volcánico, muestra 2.....       | 87 |
| Figura 28. Esfericidad Piroclasto Volcánico, muestra 3 .....      | 87 |
| Figura 29. Esfericidad Piroclasto Volcánico, muestra 4.....       | 88 |
| Figura 30. Esfericidad Piroclasto Volcánico, muestra 5 .....      | 88 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 31. Fotografía Clemex Vision de la Zeolita Clinoptilolita..... | 95  |
| Figura 32. Tabla Clemex Vision de la Zeolita Clinoptilolita.....      | 95  |
| Figura 33. Fotografía diámetro de la Zeolita Clinoptilolita .....     | 96  |
| Figura 34. Esfericidad Zeolita Clinoptilolita, muestra 1 .....        | 97  |
| Figura 35. Esfericidad Zeolita Clinoptilolita, muestra 2.....         | 97  |
| Figura 36. Esfericidad Zeolita Clinoptilolita, muestra 3.....         | 97  |
| Figura 37. Esfericidad Zeolita Clinoptilolita, muestra 4.....         | 98  |
| Figura 38. Esfericidad Zeolita Clinoptilolita, muestra 5.....         | 98  |
| Figura 39. Fotografía Clemex Vision de la Zeolita Mordenita .....     | 105 |
| Figura 40. Tabla Clemex Vision de la Zeolita Mordenita .....          | 105 |
| Figura 41. Fotografía diámetro de la Zeolita Mordenita.....           | 106 |
| Figura 42. Esfericidad Zeolita Mordenita, muestra 1 .....             | 107 |
| Figura 43. Esfericidad Zeolita Mordenita, muestra 2 .....             | 107 |
| Figura 44. Esfericidad Zeolita Mordenita, muestra 3 .....             | 107 |
| Figura 45. Esfericidad Zeolita Mordenita, muestra 4 .....             | 108 |
| Figura 46. Esfericidad Zeolita Mordenita, muestra 5 .....             | 108 |

## RESUMEN

Para la elaboración del trabajo de investigación, se inició con la identificación del problema, en el cual en la actualidad el mal tratamiento, mal uso y desperdicio del agua han causado un gran daño ambiental en nuestro planeta. A pesar de ello, en nuestra sociedad no se ha logrado causar concientización sobre las posibles consecuencias ambientales a futuro.

Por este motivo se planteó la determinación de las características físicas de sustancias reactivas: Piroclastos Volcánicos, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita de origen Ecuatoriano para el tratamiento de agua. Para la ejecución metodológica del trabajo se realizó el análisis bibliográfico del origen y las principales características fisicoquímicas de las sustancias reactivas mencionadas anteriormente. Así mismo, se diseñó e implementó un sistema de medición de permeabilidad hidráulica y porosidad.

La eficacia de un biofiltro se ve incrementada con la aplicación de microorganismos de medios porosos, para así descomponer contaminantes obtenidos en las aguas residuales; es decir; su eficacia se obtiene debido a las propiedades y características del material como: porosidad, capacidad de retención de agua y grado de compactación. Mientras más características de porosidad tenga el material, la retención de contaminantes en los efluentes es mayor.

Cabe mencionar, la utilización de las normas AASHTO, ASTM, SUCS en función de características físicas deseadas: gravedad, tamaño específico, peso unitario, granulometría, compacidad del material, porosidad, esfericidad. Utilizando equipos como Microscopio de Barrido, Software Clemex Vision, Tamizadora Eléctrica, Tamices, Permeámetro.

**Palabras clave:** Sustancias reactivas, medios filtrantes, geomorfología.

## ABSTRACT

For the elaboration of the research work, it began with the identification of the problem, in which currently the bad treatment, misuse and waste of water have caused great environmental damage on our planet. Despite this, in our society it has not been possible to raise awareness about the possible future environmental consequences.

For this reason, the determination of the physical characteristics of reactive substances was proposed: Volcanic Pyroclasts, Clinoptilolite Zeolite, Mordenite Zeolite of Ecuadorian origin for water treatment. For the methodological execution of the work, the bibliographic analysis of the origin and the main physicochemical characteristics of the reactive substances was carried out. Likewise, a hydraulic permeability and porosity measurement system was designed and implemented.

The efficiency of a biofilter is increased with the application of microorganisms from porous media, to decompose pollutants obtained in wastewater. Its effectiveness is obtained due to the properties and characteristics of the material such as: porosity, water retention capacity and degree of compaction. The more porosity characteristics the material has, the greater the retention of contaminants in the effluents.

It is worth mentioning the use of AASHTO, ASTM, SUCS standards depending on the desired physical characteristics: gravity, specific size, unit weight, granulometry, compactness of the material, porosity, sphericity. Using equipment such as Scanning Microscope, Clemex Vision Software, Electric Sieve, Sieves, Permeameter.

**Keywords:** Reactive substances, filter media, geomorphology.

## **1. CAPITULO I.- MARCO TEÓRICO**

### **1.1 Antecedentes Investigativos**

#### **1.1.1 Antecedentes**

En la actualidad el mal tratamiento, mal uso y desperdicio del agua han causado un gran daño ambiental en nuestro planeta. A pesar de ello, en nuestra sociedad no se ha logrado causar concientización sobre las posibles consecuencias ambientales a futuro.

La revista ION publicó un artículo sobre la evaluación de un filtro biológico como unidad de post-tratamiento de aguas residuales, donde se afirma que el manejo de filtros biológicos nace en el año 1950 para el tratamiento de aguas residuales. Los materiales que fueron usados en un principio como soporte en los filtros biológicos fueron rocas volcánicas, por su alta porosidad y gran diversidad en su geometría. [1]

En Chile se realizaron investigaciones para definir las principales características de los suelos volcánicos y evaluar su comportamiento geotécnico; en el cual se concreta que estos materiales presentan un comportamiento idóneo como material filtrante en la depuración de aguas residuales domésticas, de acuerdo a las propiedades principales como: densidad, porosidad, área superficial.[2]

La Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales realiza una investigación acerca de la filtración aerobia de aguas residuales municipales, donde se puede utilizar medios filtrantes de bajo costo como piedras volcánicas porosas. Cabe recalcar que, para obtener un resultado óptimo de la filtración dependerá fundamentalmente del tamaño de las piedras volcánicas que sean seleccionadas de acuerdo con el uso que vaya a tener el filtro. Para reducir DBO<sub>5</sub> y Nitrificación se recomienda utilizar partículas con diámetros superiores a 6 mm, para tratamientos terciarios y eliminación de nutrientes se recomienda partículas con un diámetro entre 2 y 3 mm. Los resultados de esta investigación indican que la remoción de DQO decrece al aumentar la carga orgánica y viceversa. Una de las desventajas en la utilización de las piedras volcánicas como tratamiento de aguas residuales es que se obtiene una reducción del 5% de su volumen a los 350 días de filtración. [3]

La eficacia de los tratamientos fisicoquímicos se ve incrementada de 3 a 6 veces con la aplicación de microorganismos fijados a medios porosos, para así descomponer contaminantes obtenidos en las aguas residuales. Es decir; la eficacia de un biofiltro se obtiene debido a las propiedades y características del material como: porosidad, capacidad de

retención de agua y grado de compactación. Mientras más características de porosidad tenga el material, la retención de contaminantes en los efluentes es mayor. [4]

En Ecuador, se estima que un 70% del agua de las cuencas hidrográficas por debajo de 2800 msnm no es apta para el consumo humano sin un previo tratamiento, generando un retraso en servicio de calidad de agua y alcantarillado. Sin embargo, el 8% de las aguas domésticas y residuales industriales tienen algún tipo de tratamiento. [5] En Tungurahua, provincia del Ecuador existe el problema de la contaminación del agua, afectando el río Ambato y Pachanlica por descargas industriales, domésticas y por la agricultura sin un previo tratamiento de agua. Según la Dirección de Higiene, Salud y Medio Ambiente, en Ambato existen 148 industrias que llegan a contaminar el agua, donde el 14% corresponde a lavadoras y lubricadoras de autos, representando la elevada y exagerada cantidad de aceites y grasas lubricantes de utilización. [6]

Sin embargo, en base a las investigaciones mencionadas anteriormente, se ha podido llegar a determinar que los materiales filtrantes de origen natural más usados son: carbón activado, grava, piroclasto volcánico, turba rubia, zeolita.

### **1.1.2 Justificación**

Según el Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) denomina agua residual, al agua que contiene composición de descargas municipales, industriales, hogares, agricultura, pecuarios, y de cualquier otro uso, el cual afectan a su calidad original. [7]

El término agua residual se utiliza para hacer referencia al agua que ha sufrido una transformación química y adhesión con residuos sólidos. Dichas aguas al momento de su descarga no pueden ser utilizadas en los procesos de los cuales fueron desechadas y al ser desechadas sin ningún tratamiento implica un gran índice de contaminación ambiental e incluso podría afectar a la salud humana. [7]

En Ecuador es cotidiano ver que las descargas de aguas residuales no reciben un tratamiento adecuado, las aguas residuales de las lavadoras de autos se caracterizan por descargar cierto contaminante de hidrocarburos y sólidos de suspensión.

Las aguas residuales que provienen de lavadoras y lubricadoras de automóviles producen efluentes con gran concentración de aceite, grasa y detergentes. Los detergentes se juntan con las grasas, aceites y éstas al tener una densidad menor al agua son separadas en dos fases. Uno de los grandes problemas de la contaminación de las aguas residuales, es la falta de concientización, el desconocimiento de las normas ambientales y la falta de control de las autoridades por el inadecuado uso de desechos lubricantes, que son vertidos en el suelo y alcantarillas, causando un gran impacto del medio ambiente y contaminación del agua.

Los tratamientos que se realizan para la eliminación de contaminantes de aguas residuales en la que se deben someter los efluentes se clasifican en tres tipos de operaciones tales como: Operaciones Físicas Unitarias, Operaciones Químicas Unitarias, Operaciones Biológicas Unitarias.

Uno de los tratamientos mayormente usados en Ecuador es el tratamiento fisicoquímico, en el cual se busca reducir la materia suspendida por medio de precipitación, sedimentación o tratamiento biológico, para reducir el índice de contaminación de aguas servidas.

En Ecuador la mayor zona de contaminación de agua se compone de descargas domésticas situadas en zonas urbanas exentas de sistemas de alcantarillado y plantas de tratamiento.

Sin embargo, al hablar de costos de implementación, operación y mantenimiento de una planta de tratamiento, cumplen un rol significativo para garantizar el desempeño de operaciones y procesos de tratamiento del agua. Los factores que determinan los costos de implementación, operación y mantenimiento de una instalación de tratamiento de aguas residuales están asociados a la complejidad de la tecnología utilizada, el tamaño de esta y la capacidad local de soportar esta complejidad. [8]

A su vez, por su composición de sólidos suspendidos son altos los costos de mantenimiento, la mayor parte ellas no poseen un plan para la reducción del índice de contaminación del agua. Dichas empresas que implementan de algún tratamiento de agua residual se caracterizan por realizar trampas de grasa que no desempeñan el adecuado funcionamiento, ya que no se calcula apropiadamente su diseño y por consiguiente las tuberías diseñadas tienden a taponarse. [9]

Uno de los tratamientos recomendable para el tratamiento de aguas servidas para lavadoras y lubricadoras de autos, es la construcción de sistemas de flotación de aire disuelto (FAD) o sistemas de ultrafiltración.[10] Así mismo, las membranas de filtración actúan como un proceso en donde ésta desempeña el papel de una barrera selectiva que restringe el pasaje de determinados compuestos tales como: iones, compuestos orgánicos, entre otros.[11]

Por consiguiente, por su constante reposición de materiales y por su alto costo de implementación hace que éstas no sean implementadas. Es por ello que se busca implementar materiales reactivos de origen Ecuatoriano, fácil accesibilidad y económicamente rentable para el tratamiento de agua.

En Ecuador, las investigaciones que se han realizado con la Zeolita han sido desarrolladas desde los años 1990 y 2000, en el cual los estudiantes de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) han ejecutado investigaciones tanto en el campus politécnico, en colaboración con la Universidad de Lovaina en Bélgica y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), han demostrado que, al realizar sistemas de filtración con la Zeolita, se obtienen niveles de purificación de agua bastante notables y logra la remoción de metales pesados como níquel, plomo, cobre, arsénico, sulfatos, fosfatos, y cloruros. [12]

Según la EPA (Environmental Protection Agency), expone que la Zeolita Clinoptilolita posee un mejor rendimiento para la remoción de amonio en aguas servidas en comparación a la

Zeolita Modernita. Las Zeolitas han sido utilizadas de diferentes maneras en el tratamiento de aguas servidas, en las cuales se encuentran filtros de arena, sistemas de filtración y la absorción de metales pesados de lodos provenientes de aguas servidas.[13]

Una de las alternativas que se puede emplear para la disminución de contaminantes en el agua, es el tratamiento de aguas residuales con métodos ambientales. En Ecuador se localiza la Zeolita, es un mineral con una estructura similar a una jaula y posee carga negativa por la sustitución isomórfica de cationes en el mineral; es decir, tiene una afinidad grande hacia los cationes y pequeña hacia los aniones o moléculas orgánicas. Al mencionar la Zeolita Clinoptilolita, es reconocida como la zeolita natural más económica y abundante, se caracteriza por ser de gran eficacia para la remoción de metales pesados y de nitrógeno amoniacal. [14]

En Chile, se han elaborado investigaciones para la obtención de las características principales de suelos volcánicos como el piroclasto volcánico, donde presentan que existe un buen comportamiento como material filtrante en la depuración de aguas residuales. Igualmente, se menciona que este tipo de suelo se lo puede encontrar fácilmente y en grandes cantidades en toda Latinoamérica donde existen volcanes activos. [15]

La Revista de Ingeniería y Ciencias Ambientales (AIDIS), expone sobre filtración aerobia de aguas residuales, donde se puede manejar medios filtrantes de bajo costo como lo son las piedras volcánicas. Para obtener resultados óptimos para la filtración depende del tamaño de piedras volcánicas que sean seleccionadas. Es por ello, que la eficacia de un filtro actúa por las características y propiedades de la sustancia reactiva; es decir, mientras el material a utilizarse es más poroso, mayor será la retención de contaminantes. [15]

Hoy en día, la adsorción es estipulada como una de las técnicas de mayor facilidad y eficacia para el tratamiento aguas residuales y su éxito del método depende de la eficiencia del adsorbente; entre ellos los más utilizados de gran eficacia y bajo costo de implementación son: carbón activado, minerales de arcilla, biomateriales, zeolitas y residuos sólidos industriales han sido utilizados como adsorbentes de iones y compuestos orgánicos en tratamiento de aguas residuales.

En vista de aquella problemática, el presente proyecto tiene como objetivo obtener la caracterización de las sustancias reactivas: Piroclastos Volcánicos, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita de origen Ecuatoriano como alternativa, eficacia, bajo costo y su fácil acceso para evitar las posibles consecuencias ambientales al obtener descargas de aguas residuales.

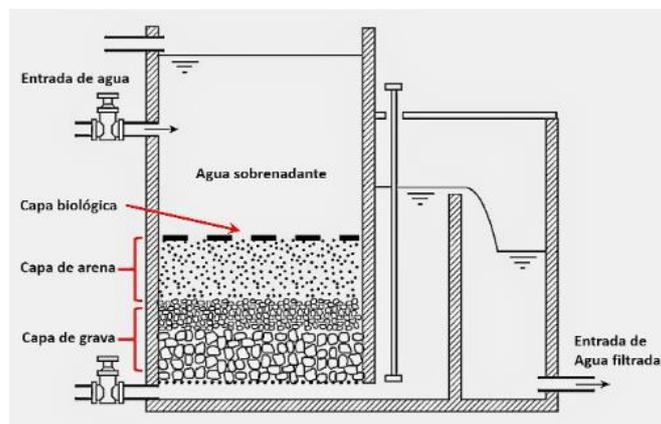
En el cual, se realizarán análisis bibliográficos de su origen y principales características fisicoquímicas de las sustancias reactivas anteriormente mencionadas. De igual manera, se realizará un diseño e implementación de medición de permeabilidad hidráulica y porosidad para el análisis de las sustancias reactivas. Finalmente, se caracterizará físicamente las sustancias reactivas para la descontaminación del agua.

### 1.1.3 Fundamentación Teórica

- **Filtración**

La filtración es un proceso físico, que consiste en la separación de la materia suspendida del agua. Esta separación ocurre cuando el agua por efecto de la gravedad va pasando a través de un medio poroso en donde las partículas suspendidas quedan retenidas en el volumen del lecho, obteniendo una reducción del índice de contaminación del agua.[16] A continuación, se presenta un esquema distintivo *Figura 1* de un filtro con diferentes capas de material detalladamente.

**Figura 1. Esquema Filtro**



**Fuente:** 13

**Filtración Lenta:** Los filtros lentos son de mayor uso para el tratamiento de efluentes industriales, son aquellos que se utiliza arena de sílice como medio filtrante, estos filtros poseen un lecho de grava en el fondo que actúan como soporte de la arena para que no se pierda al ser arrastrada por el agua residual. [16]

**Filtración Rápida:** Es un mecanismo de eliminación física, donde el flujo atraviesa el medio filtrante a velocidades altas de entre 4-50 m/h, permitiendo la separación de partículas grandes en la parte superior. En este tipo de filtración se puede utilizar como medio filtrante la arena y la grava.[17]

En la *Tabla 1* se presenta la caracterización de velocidad de filtración rápida y lenta; teniendo en cuenta el medio filtrante, dirección de flujo y tipo de carga sobre el lecho.

**Tabla 1. Caracterización de la Velocidad de Filtración**

| VELOCIDAD DE FILTRACIÓN | MEDIO FILTRANTE UTILIZADO | DIRECCIÓN DEL FLUJO | CARGA SOBRE EL LECHO   |
|-------------------------|---------------------------|---------------------|------------------------|
| Rápida                  | Lecho simple o mixto      | Ascendente          | Por presión            |
|                         |                           | Descendente         | Por gravedad o presión |
| Lenta                   | Lecho simple              | Descendente         | Por gravedad           |

Fuente: 12

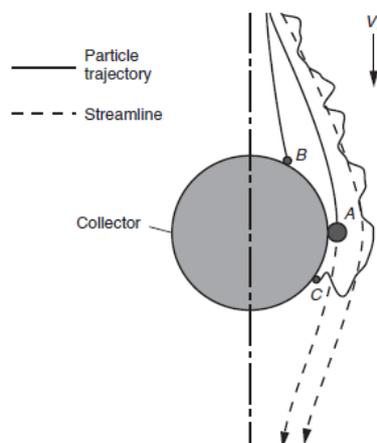
### Procesos de Remoción de Contaminantes

- Mecánico

El mecanismo para transportar partículas granulares, es expuesto en la *Figura 2*. El agua que se aproxima al colector esférico con un flujo uniforme bajo las condiciones de flujo laminar, sigue las líneas de corriente hacia cada lado del colector. [18]

Algunas partículas tendrán contacto con el colector, mientras que otras se desvían de su línea de flujo de fluido para llegar a la superficie del colector. Los detalles de los mecanismos de transporte son los siguientes: Interceptación, sedimentación, difusión, eficiencia de transporte total. [18]

**Figura 2. Remoción de Contaminantes (Proceso Mecánico)**



Fuente: 14

- Absorción

La absorción es un tratamiento físico, en el cual consiste en la captación de partículas sólidas de menor diámetro que los poros y éstos son retenidos en las aberturas del material filtrante. Este método puede ser por disolución o por reacción química, en este mecanismo la unión es más estable y participa toda la masa del adsorbente [17], presentando a continuación en la *Figura 3* un esquema del proceso de Absorción.

**Figura 3. Proceso de Absorción**



Fuente: 15

- Adsorción

La adsorción es un proceso de transferencia de masa, en el cual las sustancias presentes en fase líquida se adsorben o son acumuladas en una fase sólida, por lo tanto, su fase líquida es eliminada. [18]

Entre los adsorbentes más comunes para el tratamiento de agua son: [19]

- ✓ Alúmina activada
- ✓ Carbón Activado
- ✓ Zeolitas
- ✓ Óxido de Titanio y Hierro
- ✓ Hidróxidos
- ✓ Carbonatos
- ✓ Arenas

Esta característica permite que los átomos superficiales de un material sean atraídos y retengan moléculas que forman parte de otro material, este proceso se lo conoce como Fuerzas de Van Der Waals y es relacionado con la superficie o área del material. [20]

Una de las tecnologías disponibles actualmente y que ha mostrado gran aceptación para el tratamiento de aguas residuales es la adsorción, ya que reduce la presencia de colorantes y metales pesados en el agua, su eficiencia en la eliminación de colorantes, principalmente compuestos estables que no se consigue fácilmente eliminarse por métodos convencionales, brindando como resultado un efluente de mejor calidad y un proceso económicamente factible. [21]

La adsorción es uno de los métodos popularmente utilizados por su conveniencia y sencillez, siendo el carbono activado el adsorbente ideal para eliminar contaminantes presentes en agua. Por su alta capacidad de adsorción de materia orgánica, el carbón activado es el material adsorbente principalmente utilizado. [21]

Sin embargo, el alto costo de producción del carbón activado limita su aplicación en el tratamiento de aguas residuales, por el cual es uno de los aspectos que impiden su aplicación.

Un buen adsorbente será aquel que presente área superficial suficientemente grande y que requiera menor tiempo para alcanzar el equilibrio de adsorción, generalmente se prefieren para la eliminación de contaminantes adsorbentes con gran área superficial y alta velocidad de adsorción. [21] Posteriormente, en la *Figura 4* se presenta un esquema del proceso de adsorción.

**Figura 4. Proceso de Adsorción**



**Fuente: 15**

### **Propiedades Físicas de las sustancias reactivas**

- Granulometría

La granulometría es aquel procedimiento manual o mecánico por medio del cual se separa las partículas constitutivas del agregado según tamaños, de tal manera que se logre conocer las

cantidades en peso de cada tamaño que aporta el peso total, de esta manera se separa por tamaños utilizando mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño máximo de agregado en cada una de ellas. [22] En la *Tabla 2* se muestra la clasificación y descripción de suelo grueso o fino obtenido por una abertura de tamiz específica.

**Tabla 2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)**

| GRUPOS PRINCIPALES                                  |   |  | SÍMBOLO   | DESCRIPCIÓN   |
|---|---|--|---|---|
| SUELOS DE GRANO GRUESO (>50% retenido tamiz N° 200) | GRAVAS (>50% retenido en tamiz N° 4)          | GRAVA LIMPIA (<5% finos)               | GW  | Gravas bien graduadas, mezcla de grava y arena con poco de finos.   |
|   |   |  | GP  | Gravas mal graduadas, mezcla de grava y arena con poco de finos   |
|   |   | GRAVA SUCIA (>12% finos)               | GM  | Gravas limosas, mezcla de grava, arena y limo   |
|   |   |  | GC  | Gravas limosas, mezcla de grava, arena y arcilla  |
|   | ARENAS (>50% pasa en tamiz N° 4)              | ARENA LIMPIA (<5% finos)               | SW  | Arenas bien graduadas, arena con grava, poco o nada de finos  |
|   |   |  | SP  | Arenas mal graduadas, arena con grava, poco o nada de finos   |
|   |   | ARENA SUCIA (>12% finos)               | SM  | Arenas limosas, mezclas de arena y limo   |
|   |   |  | SC  | Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla   |
|   | SUELOS DE GRANO FINO (>50% pasa tamiz N° 200) | LIMOS Y ARCILLAS (Límite líquido <50%) | ML  | Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos pasticos                                    |
|   |   |  | CL  | Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas |
| OL  |   |  | Limos orgánicos y arcillas limosas de baja plasticidad        |   |
| LIMOS Y ARCILLAS (Límite líquido >50%)              |   | MH                                     | Limos inorgánicos con arena fina de diatomeas, suelos limosos |   |
|   |   | CH                                     | Arcillas inorgánicas de alta plasticidad                      |   |
|   |   | OH                                     | Limos orgánicos de media o alta plasticidad                   |   |
| SUELOS ORGÁNICO (mo >20%)                           |   |  | PT  | Suelos pantanosos ricos en mo (humus, turbas)   |

Fuente: [22]

A partir de los datos obtenidos en el ensayo de granulometría, se definen ciertos parámetros en el cual nos informa sobre las características de la curva en su uniformidad y graduación.

- ✓ **Tamaño Efectivo ( $D_{10}$ ):** Es aquel que detalla los diámetros de las partículas correspondientes al porcentaje de finos que pasa el 10%.
- ✓ **Diámetro Equiparable ( $D_{30}$ ):** Es aquel que detalla los diámetros de las partículas correspondientes al porcentaje de finos que pasa el 30%.
- ✓ **Diámetro Dimensional ( $D_{60}$ ):** Es aquel que detalla los diámetros de las partículas correspondientes al porcentaje de finos que pasa el 60%.
- ✓ **Coefficiente de Uniformidad ( $C_u$ ):** Brinda información sobre la distribución de los tamaños de las partículas. Si el coeficiente tiende a ser mayor a 3, indica que el suelo está bien graduado; es decir un suelo resistente e incompresible. Cuando el coeficiente tiende a ser menor a 3, indica un suelo mal graduado y no resistente. [23]

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Ec. ( 1)}$$

***Dónde:***

$C_u$  = *Coefficiente de Uniformidad*

$D_{60}$  = *Tamaño correspondiente del 60% (mm)*

$D_{30}$  = *Tamaño correspondiente del 30% (mm)*

$D_{10}$  = *Tamaño correspondiente del 10% (mm)*

- ✓ **Coefficiente de Curvatura ( $C_c$ ):** Se define el coeficiente de curvatura para evitar una granulometría con vacíos, tomando en cuenta el punto central de la curva granulométrica  $D_{30}$ ; es decir, el coeficiente deberá estar entre 1 a 3 para evitar un suelo con vacíos. [23]

Cabe recalcar, que el proceso de granulometría será de gran importancia en el proceso de filtración para el tratamiento de agua, ya que de esta manera se logrará definir tamaños y diámetros adecuados para la realización de ensayos de laboratorio y diseño óptimo del permeámetro.

A continuación, se detallará las normas utilizadas en laboratorio para la realización granulométrica de materiales.

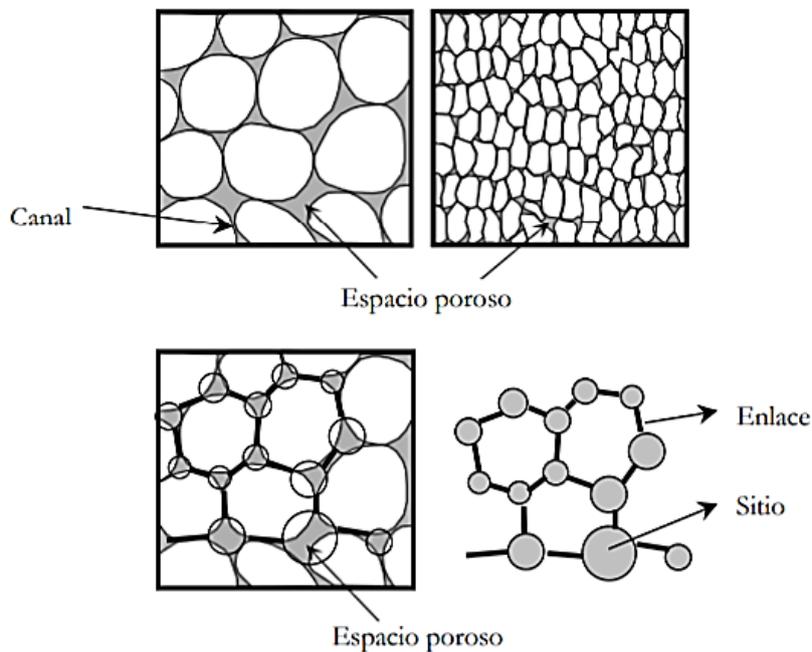
**NORMAS:** AASHTO T 87-70

ASTM D 421-58

○ Porosidad

La porosidad del suelo superficial determina en gran medida los procesos de infiltración y escurrimiento del agua que influyen en la erosión hídrica y el transporte de agua en el suelo. El flujo de agua y aire se realiza a través de la porosidad del suelo como se observa en la *Figura 5*, en el cual está condicionada por tamaño, canales, y distribución de poros. [24]

**Figura 5. Representación del espacio poroso de partículas**



**Fuente:** [25]

En la *Tabla 3* se detalla la clasificación de la porosidad de acuerdo con sus características de conducción o almacenamiento, se divide en tres categorías: Porosidad submicroscópica, Porosidad microscópica y Macroporosidad. [24]

**Tabla 3. Clasificación de la Porosidad**

| <b>CLASIFICACIÓN DE LA POROSIDAD</b> |   |   |   |
|--------------------------------------|---|---|---|
|                                      | <b>MICROPOROS</b>   | <b>MESOPOROS</b>  | <b>MACROPOROS</b>   |
| <b>DESCRIPCIÓN</b>                   | Son aquellos que son responsables de superficies de materiales carbonosos. Estableciendo su capacidad de adsorción, en ellos es donde principalmente se tiene lugar la adsorción. | Son aquellos que facilitan en la expansión de moléculas hacia los microporos y son responsables de la adsorción de moléculas de gran tamaño que no pueden acceder a los microporos. | Son aquellos que no son de gran importancia en el proceso de adsorción, es decir que actúan como canales de expansión hacia los microporos y mesoporos. |
| <b>RADIO</b>                         | 4 - 62 $\mu\text{m}$  | 62 - 250 $\mu\text{m}$  | 250 - 1000 $\mu\text{m}$  |

**Elaborado por:** Ana María Amaya Díaz

Es importante analizar el comportamiento de porosidad de los medios filtrantes ante el transporte del agua, para de esta manera lograr alcanzar con las sustancias reactivas el resultado óptimo esperado para el tratamiento de aguas.

○ Permeabilidad

Los suelos en su estado natural presentan una composición de diferentes capas y el flujo tiende a fluir entre los diferentes estratos donde es posible aplicar la Ley de Darcy para definir una permeabilidad equivalente al conjunto de capas. [26]

Existen varios procedimientos para determinar la permeabilidad del suelo, en el cual uno de ellos es con la utilización de instrumentos de laboratorio como lo son los permeámetros. [26]

Es importante mencionar que la determinación de la permeabilidad de los medios filtrantes será de gran importancia, ya que se logrará saber su comportamiento ante el flujo.

A continuación, se detallará las normas utilizadas en laboratorio para la determinación de permeabilidad de los materiales.

### Carga Constante

**NORMAS:** AASHTO T 125-66

ASTM D 2434-68

### Carga Variable

**NORMAS:** AASHTO T 125-66

ASTM D 2434-68

- **Viscosidad:** Es la propiedad de un fluido al oponerse a su flujo cuando se aplica una fuerza, los fluidos de alta viscosidad presentan una cierta resistencia a fluir y los de baja viscosidad fluyen con facilidad. La fuerza con la que una capa de fluido en movimiento arrastra consigo a las capas adyacentes de fluido determina su viscosidad. [27]
  
- **Presión del fluido:** La presión ejercida en un fluido estático depende solamente de la profundidad del fluido, la densidad del fluido y la aceleración de la gravedad. [28] Para poder obtener la presión de un fluido es necesario que éste se encuentre contenido en un recipiente, ya que la presión ejercida en el fluido afectará todo el contenido y no a una parte de él; es decir, la presión del fluido es directamente proporcional a su profundidad y densidad. [29]
  
- **Permeabilidad real – Darcy:** La Ley de Darcy describe con base en experimentos de laboratorio las características del movimiento del agua a través de un medio poroso. Darcy al diseñar filtros de arena para purificar el agua, se interesó por los factores que influían en el flujo del agua a través de los materiales arenosos; en el cual se utiliza lapilli, piroclastos de tamaño mayor a 2 cm y menores a 4 cm, siendo estos los más adecuados para el filtro. [30]
  
- **Permeabilidad Aparente o Intrínseca:** Se define como una propiedad del medio poroso e independiente de las características del fluido. La permeabilidad

intrínseca  $K$  tiene dimensiones de  $m^2$  y está relacionada con la conductividad hidráulica  $k$ : [31]

$$k = \frac{K\rho g}{\mu} \qquad \text{Ec. ( 2)}$$

- Conductividad Hidráulica

Se entiende como conductividad hidráulica a la permeabilidad que tiene el material poroso para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. [30]

Esta propiedad varía entre un material y otro de manera significativa, siendo los suelos granulares los que presentan mayor permeabilidad, mientras que los arcillosos la menor. [2]

Para la determinación de la conductividad hidráulica de los medios filtrantes utilizados, se obtiene ciertos métodos o ensayos de laboratorio, en el que se pueden realizar dos pruebas: prueba por carga constante en materiales de grano grueso y prueba por carga variable en materiales finos.

Otro método aplicable para su determinación es de materiales con poros saturados utilizando permeámetro de paredes flexibles. Este procedimiento es aplicable a un flujo de agua unidimensional y laminar, donde la masa de suelo debe encontrarse 100% saturada y se asume válida la ley de Darcy.

**NORMA:** ASTM 2000 - “Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter”

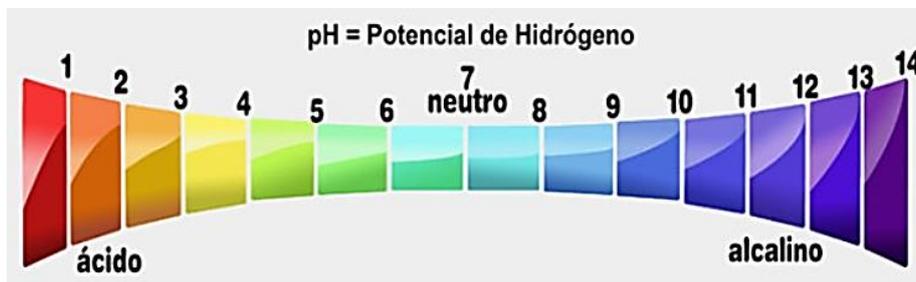
- Resistividad Hidráulica

Se define como la resistencia al paso del agua por unidad de área y de longitud de un medio permeable bajo una carga externa; en la cual es definida operacionalmente como la constante de proporcionalidad de la variación lineal del gradiente hidráulico en relación con la carga hidráulica externa. [32]

- Potencial de Hidrógeno (pH)

El Potencial de Hidrógeno (pH), es una medida de la alcalinidad de una solución, indicando la concentración de iones hidronio para que no cambien las características biológicas de un cuerpo de agua es importante la concentración de los iones anteriormente expuestos. [33] A continuación en la *Figura 6*, se presenta la escala del potencial de hidrógeno en el cual se observa que según el rango obtenido se obtendrá una medida de acidez, alcalinidad o neutral.

**Figura 6. Escala pH**



**Fuente:** 24

Es importante controlar el pH en el proceso de filtración para el tratamiento del agua, ya que si el agua acumula aceites, grasas y detergentes éstos forman una especie de nata en la superficie del líquido, provocando poca solubilidad y baja densidad del agua.

**NORMA:** NTE INEN-ISO 10523

- **Diseño de un sistema de medición de permeabilidad hidráulica**

- **Permeámetro**

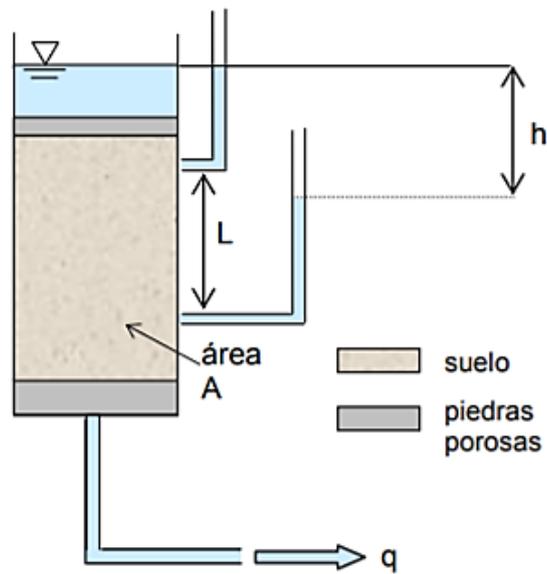
- Permeámetro de carga constante

El método de carga constante se utiliza para la determinación de coeficientes de permeabilidad en suelos tales como limos, arenas y gravas.

En el permeámetro la cantidad de agua que fluye a través de la muestra de suelo, sus dimensiones son conocidas, en un tiempo determinado puede ser medida. Los niveles de agua a la entrada y salida del permeámetro se mantienen constantes por medio de compuertas. La

pérdida de carga depende únicamente de la diferencia entre los niveles de agua. El agua de salida es recogida en una probeta graduada y la cantidad de descarga será medida. [34] Posteriormente, en la *Figura 7* se presenta el esquema del permeámetro de carga constante, en el cual se detalla su funcionalidad.

**Figura 7. Permeámetro de Carga Constante**



**Fuente:** [34]

**Dónde:**

$L$  = Longitud de la muestra

$A$  = Área de la muestra

$q$  = Descarga final

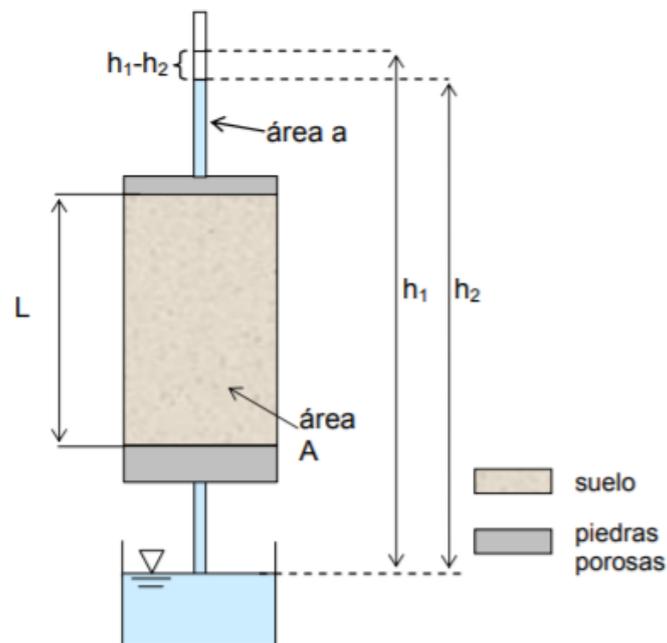
$h$  = Pérdida de carga

- Permeámetro de carga variable

El método de carga variable se utiliza para determinar el coeficiente de permeabilidad en suelos finos, tales como arena fina, limo y arcilla. Para este tipo de suelos, el flujo de agua que los atraviesa es muy pequeño para permitir mediciones con el uso del permeámetro a carga constante.[26]

En este caso la cantidad de agua escurrida es medida en forma indirecta por medio de la observación de la relación entre la caída del nivel del agua en tubo recto colocado sobre la muestra y el tiempo transcurrido. Cabe recalcar, que las observaciones deberán ser tomadas en no menos de 2 niveles diferentes de agua en el tubo recto. [34] A continuación, en la *Figura 8* se presenta el esquema del permeámetro de carga variable, en el cual se detalla su funcionalidad.

**Figura 8. Permeámetro de Carga Variable**



**Fuente:** [34]

**Dónde:**

$L$  = Longitud de la muestra

$A$  = Área de la muestra

$a$  = Área del tubo

$h_1$  = Altura del agua en un  $t_1$

$h_2$  = Altura del agua en un  $t_2$

Una vez expuestas las características y conceptos de un permeámetro a carga constante y variable a continuación, se presenta en la *Tabla 4* las diferencias y sus propiedades características de cada uno.

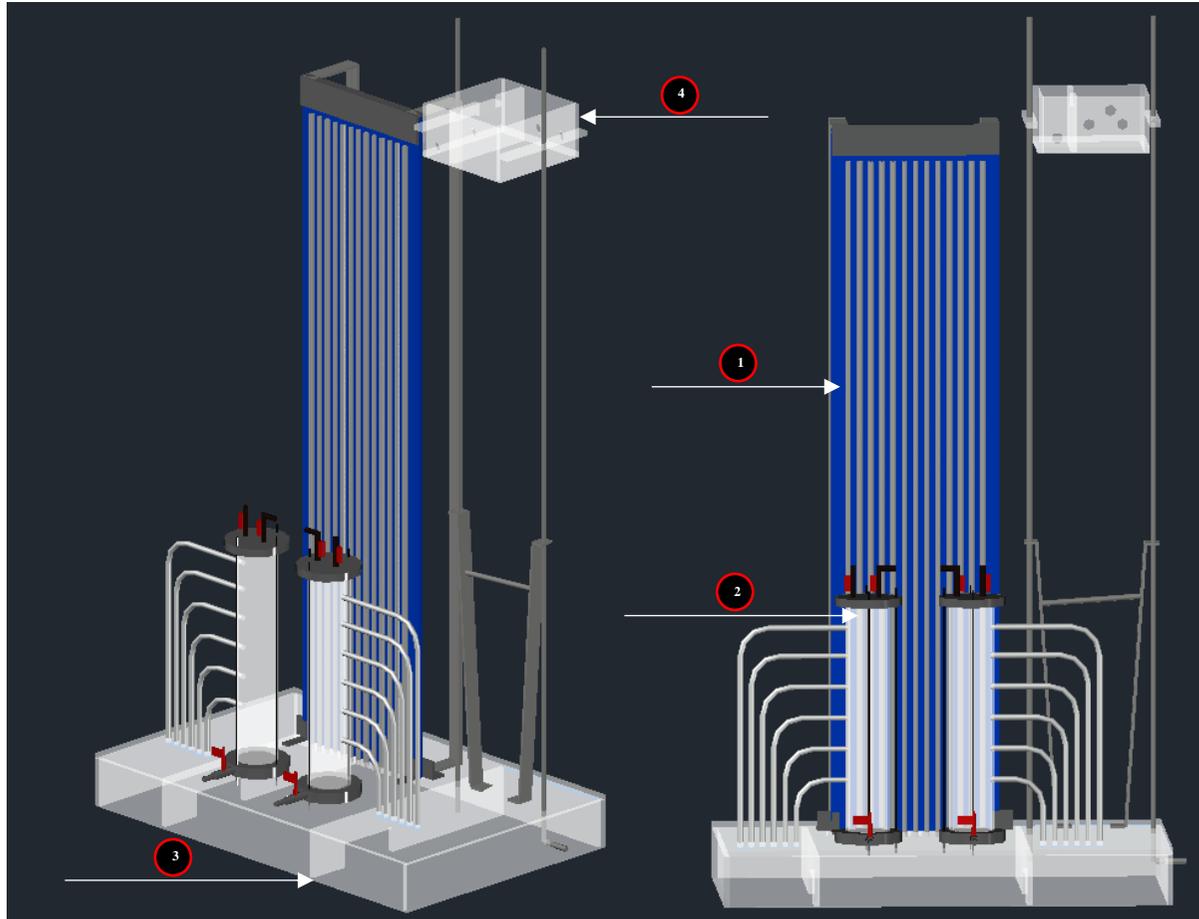
**Tabla 4. Permeámetro Carga Constante VS Permeámetro Carga Variable**

|  | <b>PERMEÁMETRO CARGA<br/>CONSTANTE</b>                    | <b>PERMEÁMETRO CARGA<br/>VARIABLE</b>  |
|--|---|--|
| <b>TIPO DE SUELO</b>                   | Arena y grava   | Arena fina, limo y arcilla   |
| <b>TIPO DE MUESTRA</b>                 | Inalterada  | Inalterada   |
| <b>CARACTERÍSTICAS<br/>PRINCIPALES</b> | La cantidad de agua que ingresa es igual<br>a la que sale | Se utiliza un<br>volumen determinado de líquido,<br>realizando diferencia de alturas del<br>tubo alimentador |
| <b>NORMAS<br/>UTILIZADAS</b>           | AASHTO T215, ASTM D2434 (Suelos Granulares)               |  |
|  | ASTM D5084 (Todos los suelos)                             |  |

**Elaborado por:** Ana María Amaya Díaz

## DISEÑO Y ESQUEMA GENERAL DEL PROTOTIPO

Figura 9. Diseño 3D del Permeámetro de Carga Constante



Elaborado por: Ana María Amaya Díaz

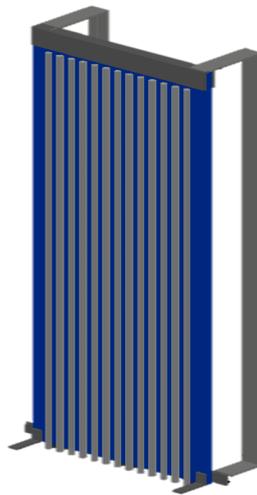
El diseño y esquema general del permeámetro de carga constante que se elaboró se ha basado en la propuesta de construcción de permeámetro de carga constante de la Universidad Piloto de Colombia. [35]

El diseño consta de un sistema de medición con 12 tubos piezométricos conectados a los cilindros mediante mangueras, dos cilindros en acrílicos sellados con una tapa superior e inferior de aluminio, una base en acrílico. Adicionalmente, cuenta con un piezómetro conectado al tanque de suministro y almacenamiento de fluido en el cual por medio de un tornillo permite variar la altura, al mencionar las conexiones hidráulicas éstas cuentan con válvulas de sellado rápido en acero inoxidable, accesorios en bronce y válvulas de bola como se presenta en la *Figura 9*.

A continuación, se detallará cada elemento con sus respectivas medidas de diseño y esquematización:

### 1. Escala Piezométrica

**Figura 10. Escala Piezométrica**

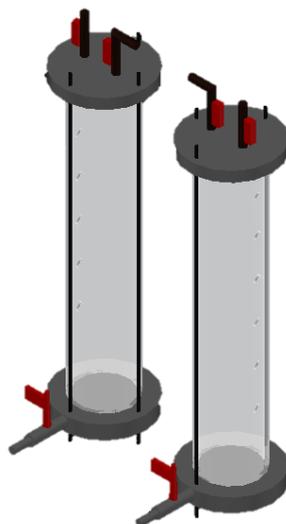


**Elaborado por:** Ana María Amaya Díaz

Está conformada por una lámina en acrílico de 1.20 x 0.30m y un espesor de 10.00mm asegurado a la base por medio de un pie de amigo. De igual manera, existe una escala milimétrica para la obtención de medidas de mayor precisión, consta de una repisa que soporta los tubos piezométricos, como se logra observar en la *Figura 10*.

## 2. Cilindros

**Figura 11. Cilindros**

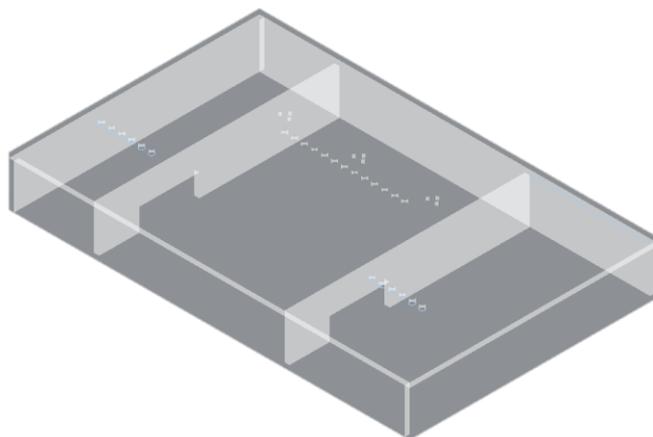


**Elaborado por:** Ana María Amaya Díaz

A continuación, se observa en la *Figura 11*, dos cilindros en acrílico de 3.00" sellados por tapas en aluminio con un diámetro externo de 12.00cm y un diámetro interno de 8.00cm. Cuenta con una tapa superior e inferior, con un espesor de 15.00mm y 20.00mm respectivamente. La tapa superior cuenta con dos perforaciones de 3/8" para la válvula de paso en cobre, su tapa inferior cuenta con una perforación de 3/8" para la válvula de paso en cobre que permite la saturación de la muestra.

## 3. Base

**Figura 12. Base Permeámetro**



**Elaborado por:** Ana María Amaya Díaz

La base del permeámetro que se logra observar en la *Figura 12.*, consta de cuatro apoyos transversales (2 centrales y 2 laterales) de 50.00 x 10.00cm. Su base cuenta con una medida de 80.00 x 50.00cm.

#### 4. Tanque de Carga Constante

**Figura 13. Tanque de Carga Constante**



**Elaborado por:** Ana María Amaya Díaz

El tanque consta de 20.00 x 20.00cm y un alto de 10.00cm en acrílico, está soportada por dos varillas de acero inoxidable de ½” y una altura de 1.20m. Además, consta con un rebosadero interno de 20.00 x 10.00cm y un alto de 5.00cm; de esta manera se genera una carga constante y se controla el nivel del agua.

#### Construcción del Permeámetro de Carga Constante

- **Norma utilizada:** ASTM D5084
- **Software utilizado:** Revit
  
- **Materiales utilizados:**
  - ✓ Acrílico
  - ✓ Tubos piezométricos

- ✓ Escala milimétrica
- ✓ Tapas para cilindros en aluminio
- ✓ Tornillos en acero inoxidable
- ✓ Piñón
- ✓ Válvula de paso en bronce de 3/8"
- ✓ Codo en bronce de 3/8"
- ✓ Válvulas de conexión rápida en acero inoxidable de 3/8"
- ✓ Manguera de 3/8"
- ✓ Varillas en acero de 1/2"

▪ **Procedimiento:**

1. Realizar bosquejo del permeámetro de carga constante que se irá a diseñar y esquematizar.
2. Determinar los materiales principales de cada pieza o componentes del equipo, teniendo en cuenta características de resistencia, durabilidad y de bajo costo.
3. Dibujar y ensamblar cada pieza del permeámetro de carga constante con las respectivas medidas que fueron detalladas en el bosquejo (escala piezométrica, cilindros, base, tanque.) utilizando el software Revit.
4. Obtener planos en el cual se detalle medidas, escalas del permeámetro de carga constante.

- **Sustancias Reactivas**

Las sustancias reactivas o medios filtrantes son aquellos materiales que permiten el paso del agua a ser tratada y a través de éstos retienen el material particulado. Los medios filtrantes se seleccionan en función de características físicas deseadas: gravedad, tamaño específico, peso unitario, granulometría, compacidad del material, porosidad, esfericidad.[36]

- **Piroclástico Volcánico**

**Concepto**

El piroclasto es aquella porción de material de origen volcánico-sedimentario que es expulsado al aire a través de la columna eruptiva durante explosiones volcánicas, tienen gran variedad de tamaño, variando desde finas partículas (<0,001 mm) hasta bombas o bloques de 5 metros de diámetro, caracterizándose por ser fragmentos muy porosos. Los piroclastos volcánicos se clasifican según su diámetro como se muestra a continuación en la *Tabla 5*. [30]

**Tabla 5. Características y Clasificación del Piroclástico Volcánico**

| DIÁMETRO PROMEDIO DE CLASTOS (mm) | NOMBRE DEL PIROCLASTO | DEPÓSITOS Y ROCAS PIROCLÁSTICAS (>75% material piroclástico) |                                      | ROCAS MIXTAS PIROCLÁSTICO-EPICLÁSTICAS (25% a 75% de piroclastos) |                                    |
|-----------------------------------|-----------------------|--|--------------------------------------|---|------------------------------------|
|                                   |                       | No Consolidado<br>TEFRA                                      | Consolidado<br>ROCA<br>PIROCLÁSTICA  |   |                                    |
| >64                               | Bombas y bloques      | Aglomerado, tefra de bombas o bloques                        | Aglomerado<br>Brecha piroclástica    | Aglomerado tobáceo<br>Brecha tobácea                              |                                    |
| 64 - 2                            | Lapilli               | Capa de lapilli<br>Tefra de lapilli                          | Toba de lapilli<br>Lapillita         |   |                                    |
| 2 - 1/16                          | Ceniza gruesa         | Ceniza gruesa  | Toba de ceniza gruesa                | Arenisca tobácea  |                                    |
| <1/16                             | Ceniza fina (polvo)   | Ceniza fina, polvo   | Toba de ceniza fina<br>Toba de polvo | 1/16 - 1/256<br><1/256  | Limolita tobácea<br>Lutita tobácea |

Fuente: [30]

Los piroclastos son fragmentos sólidos de material volcánico de morfología, color y tamaño variado el cual son expulsados al aire durante explosiones volcánicas. Con respecto a sus características, los piroclastos de proyección aérea se dispersarán y caerán siguiendo la fuerza de la gravedad. [37]

De igual manera en la *Tabla 6* el piroclasto volcánico es clasificado según su tamaño a los diferentes tipos de suelo como se presenta a continuación:

**Tabla 6. Clasificación Granulométrica**

| <b>PIROCLASTO</b> | <b>TIPO DE SUELO</b> |
|-------------------|----------------------|
| Polvo             | Limo                 |
| Ceniza            | Arena                |
| Lapilli           | Grava Fina           |
| Bomba o Bloque    | Grava Gruesa         |

**Elaborado por:** Ana María Amaya Díaz

### **Clasificación de Piroclastos según su composición**

**TAMAÑO FINO (CENIZA):** El componente dominante son los sedimentos y son clasificados en: [38]

- **Vidrio:** Son aquellas que tienen formas en Y, curvas y estructura celular; como los vitroclastos y son representadas en la *Figura 14* a continuación:

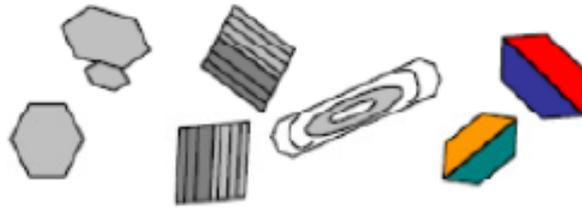
**Figura 14. Composición Vidrio**



**Fuente:** [38]

- **Cristales:** Son aquellos que tienen formas enteras, fragmentos y eu-subhedrales como el cuarzo, feldspatos, piroxenos como se presenta a continuación en la *Figura 15*.

**Figura 15. Composición Cristales**



**Fuente:** [38]

**TAMAÑO GRUESO ( $\geq$ LAPILLI):** El componente minoritario es la lava y son clasificados en: [38]

- **Fragmentos de Lava:**

**Pumita:** Vidrio de lavas ácidas, rico en vesículas, color claro.

**Escoria:** Vidrio de lavas básicas, vesículas pequeñas, color oscuro.

- **Fragmentos de Roca:**

**Volcánicos:** Coladas

**No Volcánicos:** Rocas encajantes

### **Rocas Piroclásticas**

Son aquellas de origen mixto volcánico-sedimentario que se dan a partir de eventos volcánicos explosivos, siendo el origen del material volcánico, su transporte y acumulación (procesos sedimentarios). Clasificando a los fragmentos como PIROCLASTOS y el material no consolidado como TEFRA. [38]

### **Importancia del Estudio de Rocas Piroclásticas**

- ✓ Evidencia de actividad volcánica en cuencas
- ✓ Excelentes niveles guías
- ✓ Excelentes elementos de correlación estratigráfica
- ✓ Instantaneidad en el registro geológico. [38]

A continuación, en la *Tabla 7* se presentan los procesos y productos volcánicos de mayor frecuencia, en el cual son clasificadas en flujos de lava y coladas:

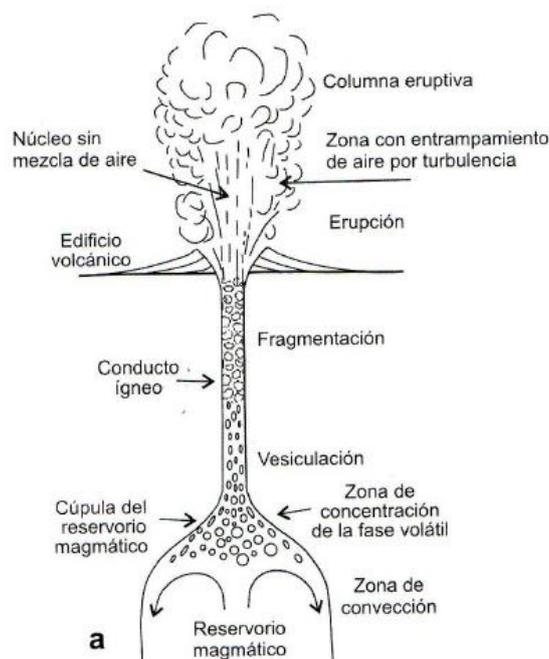
**Tabla 7. Procesos y Productos Volcánicos**

| PROCESOS Y PRODUCTOS   |   |
|--|---|
| Flujos de Lava   | Coladas                                 |
| Flujos de Densidad Calientes:<br>a) Flujos Piroclásticos<br>b) Oleadas piroclásticas | a) Ignimbritas<br>b) Depósitos de Surge |
| Flujos de Densidad Fríos o Lahares   | Depósitos de Lahares                    |
| Caída de piroclastos   | Depósitos de caída                      |

Fuente:[38]

Al conocer el proceso del piroclasto volcánico siendo una porción de material de origen volcánico-sedimentario y expulsado al aire a través de la columna eruptiva durante explosiones volcánicas, es importante conocer los principales fenómenos magmáticos de una erupción que es representada en la *Figura 16* a continuación:

**Figura 16. Principales fenómenos magmáticos**



Fuente:[38]

## **Caracterización**

En cuanto a la caracterización física del piroclasto volcánico, este es un material altamente poroso con buena capacidad de retener agua tomando en cuenta el tamaño de las partículas, se obtiene mejores resultados en suelos con baja capacidad de retención de agua. La alteración de las cenizas produce alofanos, minerales de la fracción arcilla con bajo grado de cristalización y son asociados con materia orgánica formando micro agregados, éstos son porosos, livianos, de baja densidad, permitiendo una alta retención hídrica, aireación y permeabilidad.

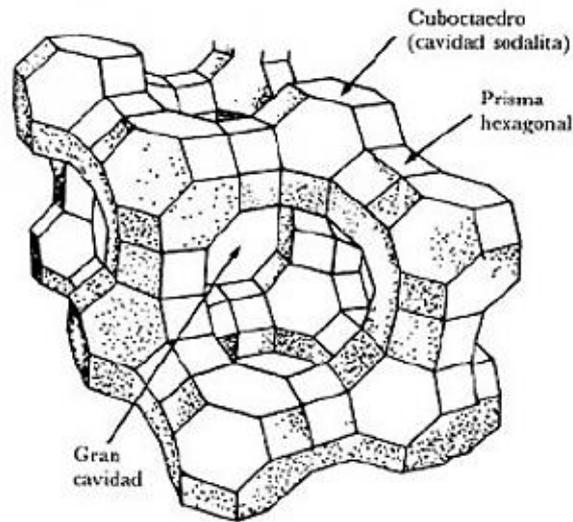
Los resultados obtenidos del piroclasto volcánico como material filtrante, en [37] explica que obtuvo una eficiencia del piroclasto, mejorando como material filtrante luego de haber realizado retro - lavados para eliminar lodos acumulados y partículas finas del material, aceites y grasas generadas por las aguas residuales, argumentando que el piroclasto volcánico podría ser una alternativa factible como material filtrante en pretratamientos de lavadoras y lubricadoras de autos, debido a sus características de porosidad granular y densidad, utilizando una granulometría de partículas que oscilan entre 4.8 y 9.5 mm.

- **Zeolita**

La zeolita es un mineral volcánico natural que fue formado hace millones de años, su reacción química entre las cenizas del volcán y la sal del mar forman las zeolitas en la lava endurecida. El nombre zeolita proviene de la combinación de las palabras griegas Zeo (hervir) y Lithos (piedra). [39]

Las zeolitas naturales son abundantes y de bajo costo, son aluminosilicatos hidratados cristalinos con una estructura de marco que contiene poros ocupados por agua, alcalinos y cationes alcalinotérreos. Debido a su alta capacidad de intercambio catiónico, las zeolitas han sido ampliamente utilizados como adsorbentes y utilizadas para procesos de purificación.[40] A continuación, en la *Figura 17* se presenta las principales particularidades que conforma la estructura de la Zeolita.

**Figura 17. Estructura Zeolita**



**Fuente:** [39]

### **Propiedades de la Zeolita**

Las aplicaciones de la zeolita están basadas principalmente en las siguientes propiedades fisicoquímicas: [41]

- ✓ Alto nivel de intercambio y selectividad de iones
- ✓ Hidratación y deshidratación reversibles
- ✓ Gran capacidad de sorción de gases
- ✓ Gran estabilidad térmica
- ✓ Resistencia contra agentes agresivos

### **Ventajas de la Zeolita**

- ✓ Reduce el porcentaje de la acidez del agua.
- ✓ Mayor claridad en el agua filtrada.
- ✓ Es uno de los medios filtrante más duradero, alrededor de cinco años.
- ✓ Requiere de un simple retro lavado periódico. [41]

### **Aplicación Industrial**

Como material industrial las zeolitas son utilizadas como intercambiadores de iones, adsorbentes y catalizadores. Es por ello que por su capacidad de intercambio iónico las zeolitas naturales (Clinoptilolita, Mordenita, Chabasita) pueden emplearse para: [42]

1. Reducción de la contaminación ambiental creada por las aguas residuales industriales y municipales.
2. Proceso de reducción de la dureza del agua.
3. Mejoramiento de productividad agrícola, utilizadas como fertilizantes.

### Aplicación como Adsorbente

En la *Tabla 8*, se muestra que las zeolitas tienen un área interna disponible, ya que debido a sus canales o poros que poseen se introducen uniformemente por todo el volumen de sólido, detallándose a continuación que los diferentes tipos de zeolitas remueven, separan o purifican.[43]

**Tabla 8. Zeolitas Naturales como Adsorbente**

| APLICACIÓN                   | ÁREA                                   | TIPO DE ZEOLITA                        |
|------------------------------|--|--|
| REMOCIÓN DE SO <sub>2</sub>  | Residuo de Gas Industrial              | Clinoptilolita                         |
| REMOCIÓN DE CO <sub>2</sub>  | Gas Natural y de Suelos                | Chabazita                              |
| SEPARACIÓN DE GAS            | CH <sub>4</sub> , N <sub>4</sub>       | Clinoptilolita                         |
| REMOCIÓN DE CH <sub>4</sub>  | Gas de Mina                            | Clinoptilolita                         |
| REMOCIÓN DE METAL            | Refinación de Metal                    | Clinoptilolita                         |
| PURIFICACIÓN DE GAS          | Hidrógeno                              | Mordenita                              |
| PRODUCCIÓN DE O <sub>2</sub> | Olores secundarios<br>Crianza de Peces | Mordenita<br>Mordenita/ Clinoptilolita |
| PRODUCCIÓN DE N <sub>2</sub> | Gas Atmosférico Inerte                 | Mordenita                              |
| CONTENEDOR DE OLORES         | Refrigeradores                         | Mordenita/ Clinoptilolita              |

**Fuente:** [43]

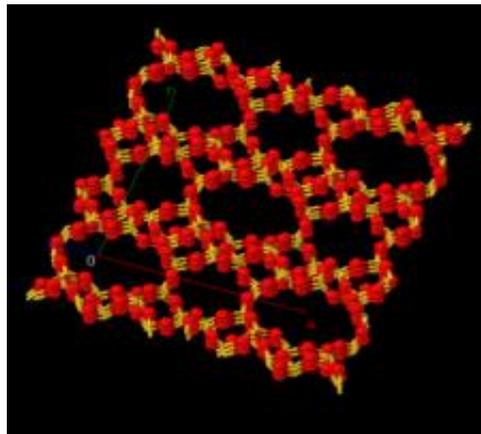
La Zeolita es un gran absorbente natural por su alto grado de hidratación y son utilizadas como desecadores de gases y en la separación de aire (Mordenita, Clinoptilolita). Sin embargo, su densidad es baja y conserva un gran volumen de vacíos al deshidratarse. Siendo un captador de alta capacidad ya que retiene partículas de hasta 5 micras. [41]

Tienen grandes propiedades como absorbentes, las zeolitas deshidratadas tienen estructuras porosas y son capaces de absorber grandes cantidades de sustancias aparte de agua. Los tamaños de anillo de las ventanas que poseen en el interior de las cavidades determinan el tamaño de las moléculas que pueden ser absorbidas. [44]

- **Zeolita Clinoptilolita**

En la *Figura 18*, se detalla la estructura porosa de la Clinoptilolita presentando tres canales huecos: un canal formado por anillos contiguos de ocho miembros con un acceso libre de 0.26 x 0.47 (nm) y dos canales paralelos, uno de ocho miembros con ventanas de acceso de 0.33 x 0.46 (nm) y un canal de 10 miembros con acceso de 0.3 x 0.76 (nm). [45]

**Figura 18. Estructura Zeolita Clinoptilolita**

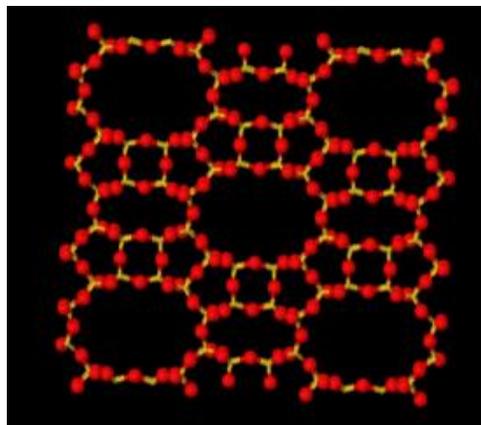


Fuente: [45]

- **Zeolita Mordenita**

La Zeolita Mordenita en la *Figura 19*, detalla su estructura caracterizada por la presencia de dos canales: uno de 12 miembros con un acceso libre de 0.65 x 0.7 (nm) y otro de 8 miembros con una ventana de entrada de 0.26 x 0.57 (nm). [45]

**Figura 19. Estructura Zeolita Mordenita**



Fuente: [45]

#### **1.1.4 Hipótesis**

##### **HIPOTESIS ALTERNA**

Las características físicas de sustancias reactivas: Piroclasto Volcánico, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita de origen Ecuatoriano se asemejan a los parámetros de lechos filtrantes utilizados para el tratamiento de agua.

##### **HIPOTESIS NULA**

Las características físicas de sustancias reactivas: Piroclasto Volcánico, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita de origen Ecuatoriano no se asemejan a los parámetros de lechos filtrantes utilizados para el tratamiento de agua.

#### **1.2 Objetivos:**

##### **1.2.1 Objetivo General**

Determinar las características físicas de sustancias reactivas: Piroclastos Volcánicos, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita de origen ecuatoriano para el tratamiento de agua.

##### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Analizar bibliográficamente el origen y las principales características fisicoquímicas de las sustancias reactivas: Piroclastos Volcánicos, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita.
- Diseñar e implementar un sistema de medición de permeabilidad hidráulica y porosidad para el análisis de las sustancias reactivas.
- Caracterizar físicamente las sustancias reactivas: Piroclastos Volcánicos, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita para la descontaminación del agua.

## 2. CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

### 2.1 Descripción de la Metodología

El proyecto experimental se basa en los siguientes tipos de investigación:

- ***Investigación Exploratoria:*** El cuidado y elaboración de plantas de tratamiento ha sido un tema poco abordado en nuestro país. La finalidad del presente proyecto consiste en la determinación de las características físicas de sustancias reactivas: Piroclastos Volcánicos, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita de origen Ecuatoriano para la descontaminación del agua; en el cual se permitirá comprobar la funcionalidad que tendrían los materiales naturales o sustancias reactivas como medio filtrante.
- ***Investigación Experimental:*** Es una investigación experimental, ya que se tomará varias muestras de agua filtrada, observando el comportamiento que tendrá presentando los materiales filtrantes o sustancias reactivas en el agua filtrada; y de esta manera analizar si contribuye a la disminución de contaminación del agua cumpliendo con los límites máximos permisibles.
- ***Investigación de Laboratorio:*** Es una investigación de laboratorio, ya que se implementará un sistema de medición de permeabilidad hidráulica y porosidad para de esta manera realizar un análisis de las sustancias reactivas utilizadas. Se realizarán dichos ensayos en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.
- ***Investigación Aplicada:*** Es una investigación aplicada, ya que el proyecto busca en determinar las características físicas de las sustancias reactivas consiguiendo la reducción de los niveles de contaminación del agua, mediante el diseño e implementación de un permeámetro.

### 2.2 Materiales y Equipos

En el presente trabajo de investigación se realizaron dos tipos de análisis: recolección de información de las sustancias reactivas y caracterización en laboratorio.

### 2.1.1 Sustancias Reactivas

#### PIROCLASTO VOLCÁNICO

**Descripción:** Son aquellos fragmentos sólidos de material volcánico de morfología, color y tamaño variado el cual son expulsados al aire durante explosiones volcánicas.

**Propiedades Físicas:** Es un material altamente poroso con buena capacidad de retener agua tomando en cuenta el tamaño de las partículas, se obtiene mejores resultados en suelos con baja capacidad de retención de agua.

**Propiedades Químicas:** Éstos se diferencian por su grado de acidez o por la cantidad de anhídrido silícico que contienen.

**Origen:** Baños de Agua Santa, Ecuador.

**Empresa:** Ninguna, obtenida en las faldas del volcán Tungurahua.

**Marca:** Sin marca.

#### ZEOLITA CLINOPTILOLITA

**Descripción:** Su estructura porosa presenta tres canales huecos: un canal formado por anillos contiguos y dos canales paralelos.

**Propiedades Físicas:** Son utilizadas como intercambiadores de iones, adsorbentes y catalizadores. Es por ello que, por su capacidad de intercambio iónico la zeolita puede utilizarse para reducción de contaminación de aguas residuales, reducción de dureza del agua y el mejoramiento de productividad agrícola.

**Propiedades Químicas:** La reacción química entre las cenizas del volcán y la sal del mar, forman las zeolitas en la lava endurecida durante miles de años, son aluminosilicatos hidratados cristalinos con una estructura de marco que contiene poros ocupados por agua, alcalinos y cationes alcalinotérreos.

**Origen:** Quito, Ecuador.

**Empresa:** SUMIWATER

**Marca:** TURBIMAX

## ZEOLITA MORDENITA

**Descripción:** Su estructura se caracteriza por la presencia de dos canales: un canal de 12 miembros con acceso libre y otro de 8 miembros con una ventana de entrada.

**Propiedades Físicas:** Son utilizadas como intercambiadores de iones, adsorbentes y catalizadores. Es por ello que, por su capacidad de intercambio iónico la zeolita puede utilizarse para reducción de contaminación de aguas residuales, reducción de dureza del agua y el mejoramiento de productividad agrícola.

**Propiedades Químicas:** La reacción química entre las cenizas del volcán y la sal del mar, forman las zeolitas en la lava endurecida durante miles de años, son aluminosilicatos hidratados cristalinos con una estructura de marco que contiene poros ocupados por agua, alcalinos y cationes alcalinotérreos.

**Origen:** Guayaquil, Ecuador.

**Empresa:** Ninguna, obtenida en mina afueras de la ciudad del Guayas.

**Marca:** Sin marca.

## 2.1.2 Instrumentos, Equipos y Materiales de Laboratorio

A continuación, se detalla los instrumentos, equipos y materiales utilizados para la realización de los diferentes ensayos empleados, manejando las normas estipuladas para cada tipo de ensayo de laboratorio.

| <b>GRANULOMETRÍA</b>  |  |
|---|--|
| <b>Norma:</b> AASHTO: T-87-70 ,ASTM: D - 421-58                                     |  |
| <b>EQUIPOS</b>  |  |
|   |   |
| Tamices cuadrados: 2", 1", 3/4", 3/8", #4.  | Tamices redondos: #16, #30, #40, #50, #60  |
|  |  |
| Fuente cuadrada   | Fuente redonda con tapa  |



Tamizadora eléctrica



Horno



Balanza Mecánica



Recipientes metálicos



Brocha



Enrazador



Palustre

**MATERIALES**



Piroclasto Volcánico, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita

## PERMEABILIDAD

Norma: ASTM: D – 2434 – 68, AASHTO: T – 125 – 66

### EQUIPOS



Tamices redondos: #16, #30, #40, #50, #60



Tamizadora eléctrica



Permeámetro



Cinta métrica

### MATERIALES

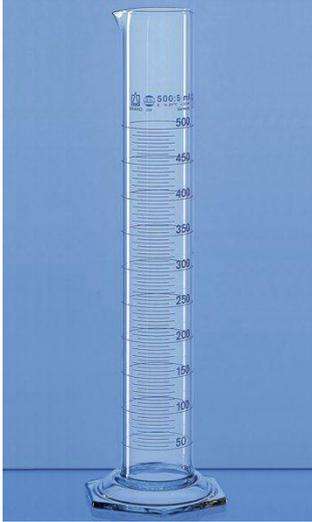


Piroclasto Volcánico, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita

## COEFICIENTE DE COMPACIDAD

**Norma:** ASTM: D854-58 , AASHTO T- 100 , NTE-INEN 858 (ASTM-C29)

### EQUIPOS



Probeta



Horno



Balanza



Embudo



Varilla



Cilindro

|  |  |
|--|--|
|     |  |
| Enrazador  | Pie de Rey   |
|     |  |
| Flexómetro   |  |
| <b>MATERIALES</b>  |  |
|  |  |
| Piroclasto Volcánico, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita                      |  |

## TAMAÑO ESPECÍFICO

**Norma:** AASHTO: T-87-70 ,ASTM: D - 421-58

### EQUIPOS



Tamices cuadrados: 2", 1", 3/4", 3/8", #4.



Tamices redondos: #16, #30, #40, #50, #60



Fuente cuadrada



Fuente redonda con tapa



|   |   |
|---|---|
| Tamizadora eléctrica  | Horno   |
|    |   |
| Balanza Mecánica  | Recipientes metálicos   |
|   |  |
| Brocha  | Enrazador   |
|  |   |
| Palustre  |   |
| <b>MATERIALES</b>   |   |

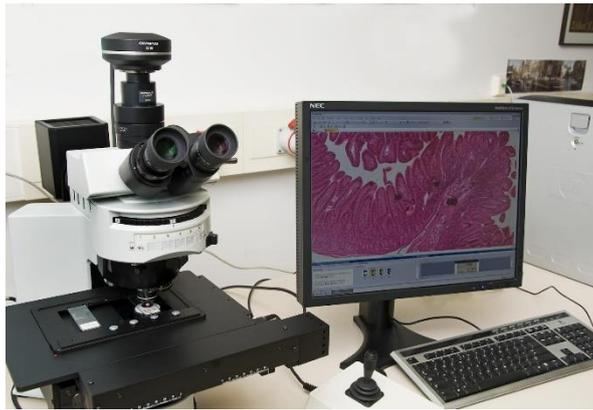


Piroclasto Volcánico, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita

## POROSIDAD

Para la obtención de la porosidad de cada una de las sustancias reactivas (*Piroclasto Volcánico, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita*) se utilizó el Clemex Vision, en el cual es un software de procesamiento digital para realizar análisis de imágenes que permiten efectuar diferentes aplicaciones como: porcentajes de porosidad, porcentaje de constitución del material, medición de granos y partículas, nódulos por área, etc.) [46]

## EQUIPOS



Clemex Vision (Software)

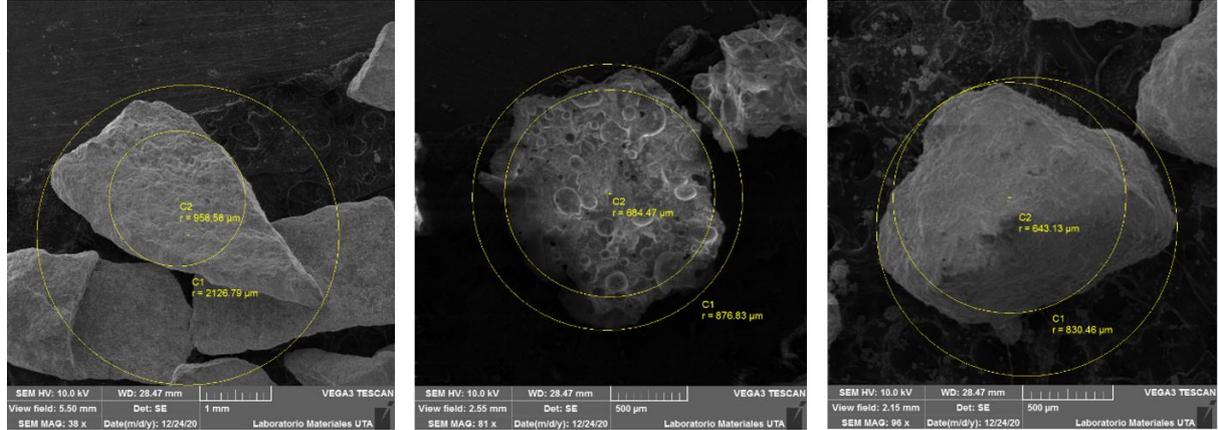
## MATERIALES



Piroclasto Volcánico, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita

## ESFERICIDAD

## MATERIALES



Imágenes JPEG captadas y guardadas del Microscopio de Barrido

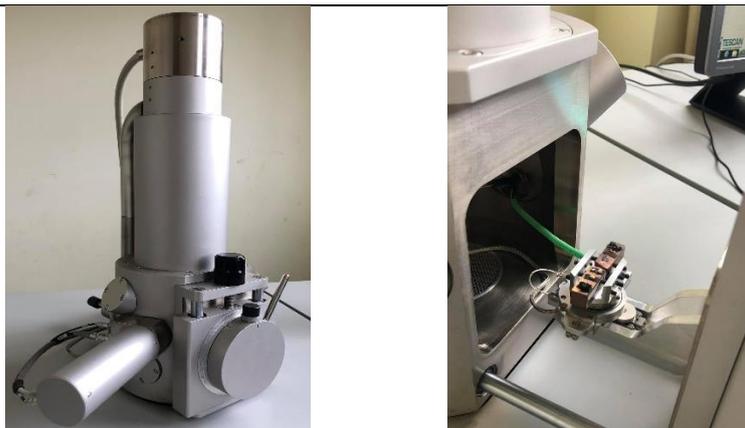


Piroclasto Volcánico, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita

## MICROSCOPIO DE BARRIDO

El microscopio electrónico de barrido utiliza electrones para crear una imagen. El equipo cuenta con un filamento que genera un haz de electrones para iluminar la muestra y con diferentes detectores que son recogidos después los electrones generados de la interacción con la superficie de la misma para crear una imagen refleja las características superficiales de la misma, brindando información de: textura, forma y composición química.[47]

## EQUIPOS



Microscopio Electrónico de Barrido

## MATERIALES



Gafas de protección



Guantes Látex



Cinta doble Faz



Pinzas

## MATERIALES



Piroclasto Volcánico, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita

## **2.2 Métodos**

### **2.2.1 Plan de Recolección de Datos**

A continuación, se enlista el procedimiento de cada ensayo realizado presentando las características físicas de cada sustancia reactiva para la recolección de datos.

#### **GRANULOMETRIA**

- **PROCEDIMIENTO**

**PASO 1:** Pesar la muestra de suelo.

**PASO 2:** Ordenar los tamices cuadrados de menor a mayor.

**PASO 3:** Colocar la muestra de suelo sobre los tamices.

**PASO 4:** Tomar los pesos acumulados de cada tamiz hasta el tamiz #4.

**PASO 5:** Pesar el suelo que pasa el Tamiz #4 individual.

**PASO 6:** Verificar que el error sea menor al 1 % de la muestra total.

**PASO 7:** Enrazar el suelo que pasa el Tamiz #4.

**PASO 8:** Dividir en 4 partes iguales aproximadamente.

**PASO 9:** Seleccionar 2 partes de suelo.

**PASO 10:** Pesar el suelo controlando que sea menor a 2000 gr.

**PASO 11:** Lavar el suelo seleccionado.

**PASO 12:** Llevar la muestra de suelo al horno.

**PASO 13:** Pesar la muestra de suelo + recipiente.

**PASO 14:** Ordenar los tamices redondos de menor a mayor.

**PASO 15:** Colocar el suelo seco sobre los tamices.

**PASO 16:** Poner en la tamizadora eléctrica durante 5 minutos.

**PASO 17:** Pesar y acumular el suelo contenido en cada tamiz hasta el #200.

**PASO 18:** Pesar individualmente el suelo que pasa el tamiz #200.

**PASO 19:** Verificar que el error sea menor al 1 % de la muestra seleccionada.

## **PERMEABILIDAD**

### ▪ **PROCEDIMIENTO**

**PASO 1:** Tamizar la muestra de suelo, deberá pasar por el tamiz #30 y retiene el #50.

**PASO 2:** Colocar el suelo en tres capas.

**PASO 3:** Dar 10, 14 y 18 golpes en cada capa, con el pisón.

**PASO 4:** Medir la longitud de la muestra.

**PASO 5:** Medir la altura de carga hidráulica.

**PASO 6:** Medir el diámetro interior del permeámetro.

**PASO 7:** Tomar el tiempo que se tarda en atravesar la muestra del suelo.

**PASO 8:** Tomar la temperatura.

## **COEFICIENTE DE COMPACIDAD**

### ▪ **PROCEDIMIENTO**

#### **PESO UNITARIO:**

**PASO 1:** Utilizar el flexómetro y tomar la altura del cilindro utilizado

**PASO 2:** Utilizar el pie de rey y tomar la medida del diámetro del cilindro

**PASO 3:** Pesar el cilindro sin la sustancia reactiva

**PASO 4:** Determinar el volumen del cilindro

**PASO 5:** Llenar el cilindro con la sustancia reactiva y proceder a enrasar

**PASO 6:** Pesar el cilindro con la sustancia reactiva

**PASO 7:** Determinar el peso de la sustancia reactiva utilizada

**PASO 8:** Vaciar el cilindro

**PASO 9:** Repetir el paso 5 al 8 y repetir cinco veces este procedimiento

**PASO 10:** Determinar el peso unitario de la sustancia reactiva dividiendo el peso del agregado para su volumen.

### **PESO ESPECÍFICO:**

**PASO 1:** Pesar la sustancia reactiva

**PASO 2:** Llenar el picnómetro con agua hasta la marca de aforo

**PASO 3:** Pesar el picnómetro más el agua

**PASO 4:** Sacar 1/3 de agua aproximadamente

**PASO 5:** Colocar la muestra de suelo en el picnómetro.

**PASO 6:** Llenar con agua el picnómetro hasta la marca de aforo

**PASO 7:** Colocarla en el horno a 110 °C

**PASO 8:** Sacar el aire obtenido durante 5 minutos

**PASO 9:** Tomar la temperatura

**PASO 10:** Pesar el picnómetro + agua + sustancia reactiva

**PASO 11:** Pesar el recipiente vacío

**PASO 12:** Desalojar en el recipiente el agua + sustancia reactiva

**PASO 13:** Colocar ese recipiente al horno durante 24 horas

**PASO 14:** Pesar el recipiente + sustancia reactiva

**PASO 15:** Hallar el peso específico de la sustancia reactiva

**PASO 16:** Determinar el índice de vacíos de la sustancia reactiva dividiendo los pesos específicos obtenidos del ensayo del picnómetro para el peso unitario de la sustancia reactiva y proceder a determinar el coeficiente de compacidad.

## **TAMAÑO ESPECÍFICO**

- **PROCEDIMIENTO**

**PASO 1:** Obtener el 5% del total de la muestra tamizada

**PASO 2:** Identificar la abertura del tamiz que cumple con dicho porcentaje, de esta manera se determinara su tamaño de acuerdo con su abertura.

## **POROSIDAD**

- **PROCEDIMIENTO**

**PASO 1:** Utilizar las fotografías obtenidas del Microscopio de Barrido e introducirlo en el programa Clemex

**PASO 2:** Identificar el porcentaje de poros que existe

**PASO3:** Utilizar la herramienta de medición de radio y trazar círculos en los poros,

**PASO4:** Identificar si es microporo, mesoporo o macroporo.

## **ESFERICIDAD**

- **PROCEDIMIENTO**

**PASO 1:** Obtener imágenes del Microscopio de Barrido de cada sustancia reactiva que se desea analizar

**PASO 2:** Analizar el radio interno y externo obtenido de la sustancia reactiva a estudiar y realizar los cálculos típicos respectivos.

## MICROSCOPIO DE BARRIDO

- **PROCEDIMIENTO**

**PASO 1:** Tomar muestras de cada sustancia reactiva que va a ser analizada y colocar en las probetas que contienen cinta de carbono doble faz conductora.

**PASO 2:** Colocar de 5 a 10 piedras de muestra la sustancia reactiva para que puedan ser analizadas.

**PASO 3:** Determinar mediante la herramienta de medición la esfera mayor y de la menor para poder determinar la esfericidad del material.

### 2.2.2 Plan de Procesamiento y Análisis de Información.

A continuación, para el plan de procesamiento y análisis de información se ha ordenado una matriz de la siguiente manera:

| <b>PIROCLÁSTO VOLCÁNICO</b>  |   |
|--|---|
| <b>Figura 20. Fotografía Piroclasto Volcánico</b>  |   |
|                                    |  |
| <b>Elaborado por: Ana María Amaya Díaz</b>   |   |
| <b>ENSAYO: GRANULOMETRÍA</b>   |   |
| <ul style="list-style-type: none"><li>▪ <b><u>CÁLCULO DEL ERROR:</u></b></li></ul>                                   |   |
| $Err = \frac{\text{Peso inicial de suelo} - \text{Peso acumulado en tamices}}{\text{Peso inicial de suelo}} * 100\%$ |   |
| $Err = \frac{6000 \text{ gr} - 5118.50 \text{ gr}}{6000 \text{ gr}} * 100\%$   |   |
| $Err = 14.69 \%$   |   |
| <b>Dónde:</b>  |   |
| <b>Err = Porcentaje de error (%)</b>   |   |

▪ **CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD:**

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$Cu = \frac{11.00 \text{ mm}}{1.10 \text{ mm}}$$

$$Cu = 10.00$$

***Dónde:***

***Cu = Coeficiente de uniformidad***

***D<sub>60</sub> = Tamaño correspondiente del 60% (mm)***

***D<sub>10</sub> = Tamaño correspondiente del 10% (mm)***

▪ **CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CURVATURA**

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}}$$

$$Cc = \frac{(7.22 \text{ mm})^2}{11.00 \text{ mm} * 1.10 \text{ mm}}$$

$$Cc = 4.31$$

***Dónde:***

***Cc = Coeficiente de curvatura***

***D<sub>60</sub> = Tamaño correspondiente del 60% (mm)***

***D<sub>30</sub> = Tamaño correspondiente del 30% (mm)***

***D<sub>10</sub> = Tamaño correspondiente del 10% (mm)***

## ENSAYO: PERMEABILIDAD

### ▪ DETERMINACIÓN TIEMPO:

$$t = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5}$$

$$t = \frac{4.05 \text{ seg} + 4.03 \text{ seg} + 4.43 \text{ seg} + 4.10 \text{ seg} + 4.23 \text{ seg}}{5}$$

$$t = 4.17 \text{ seg}$$

**Dónde:**

$t$  = Tiempo (seg)

$t_1$  = Tiempo 1 (seg)

$t_2$  = Tiempo 2 (seg)

$t_3$  = Tiempo 3 (seg)

$t_4$  = Tiempo 4 (seg)

$t_5$  = Tiempo 5 (seg)

### ▪ DETERMINACIÓN ÁREA TRANSVERSAL:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi * (6.40 \text{ cm})^2}{4}$$

$$A = 32.17 \text{ cm}^2$$

**Dónde:**

$A$  = Área ( $\text{cm}^2$ )

$\pi$  = Pi

$D$  = Diámetro (cm)

▪ **DETERMINACIÓN COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD:**

$$k = \frac{V * L}{A * t * h}$$

$$k = \frac{25.00 \text{ cm}^3 * 6.90 \text{ cm}}{32.17 \text{ cm}^2 * 4.17 \text{ seg} * 68.50 \text{ cm}}$$

$$k = 0.01877 \text{ cm/seg}$$

*NOTA: Al haber obtenido el coeficiente de permeabilidad, se procede a la transformación del coeficiente a notación científica.*

$$k = 1.88 \times 10^{-2} \text{ cm/seg}$$

**Dónde:**

*k = Coeficiente de Permeabilidad (cm/seg)*

*V = Volumen (cm<sup>3</sup>)*

*L = Longitud (cm)*

*A = Área (cm<sup>2</sup>)*

*t = Tiempo (seg)*

*h = Altura (cm)*

**ENSAYO: COMPACIDAD**

▪ **DETERMINACIÓN VOLUMEN:**

$$Vol = \pi * r^2 * h$$

$$Vol = \pi * (4.00 \text{ cm})^2 * 16.40 \text{ cm}$$

$$Vol = 824.35 \text{ cm}^3$$

**Dónde:**

*V = Volumen (cm<sup>3</sup>)*

*$\pi$  = Pi*

$r = \text{Radio (cm)}$

$h = \text{Altura (cm)}$

▪ **DETERMINACIÓN DENSIDAD:**

$$D = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}}$$

$$D = \frac{801.20 \text{ gr}}{824.35 \text{ cm}^3}$$

$$D = 0.97 \text{ gr/cm}^3$$

*Dónde:*

$D = \text{Densidad (gr/cm}^3\text{)}$

$M = \text{Masa (gr)}$

$V = \text{Volumen (cm}^3\text{)}$

▪ **DETERMINACIÓN COEFICIENTE DE VACÍOS:**

$$e = \frac{\text{Peso Específico}}{\text{Peso Unitario}}$$

$$e = \frac{2.51 \text{ gr/cm}^3}{2.88 \text{ gr/cm}^3}$$

$$e = 0.87$$

*Dónde:*

$e = \text{Coeficiente de vacíos}$

▪ **DETERMINACIÓN COEFICIENTE DE COMPACIDAD:**

$$Cr = \frac{e_{\text{máx}} - e}{e_{\text{máx}} - e_{\text{min}}} * 100\%$$

$$Cr = \frac{2.60 - 2.50}{2.60 - 2.47} * 100\%$$

$$Cr = 76.92 \%$$

**Dónde:**

*Cr = Coeficiente de compacidad*

*e = Coeficiente de vacíos*

*e<sub>máx</sub> = Coeficiente de vacíos máxima*

*e<sub>mín</sub> = Coeficiente de vacíos mínima*

### ENSAYO: TAMAÑO ESPECÍFICO

▪ **DETERMINACIÓN TAMAÑO NOMINAL MÁXIMO:**

*Peso Retenido = 1696.80 gr*

$$TNM = \text{Peso Retenido} * 5\%$$

$$TNM = 1696.80 \text{ gr} * 5\%$$

$$TNM = 84.84 \text{ gr}$$

El *tamaño nominal máximo* se encuentra en el Tamiz #40 (0.43mm) con un valor de 89.00 gr.

**Dónde:**

*TNM = Tamaño nominal máximo (gr)*

### ENSAYO: POROSIDAD

$$n = \frac{n_1 + n_2}{2} * 100\%$$

$$n = \frac{35.30 + 36.30}{2} * 100\%$$

$$n = 35.80\%$$

**Dónde:**

$n$  = Porosidad (%)

$n_1$  = Porosidad muestra 1 (%)

$n_2$  = Porosidad muestra 2 (%)

### ENSAYO: ESFERICIDAD

▪ **DETERMINACIÓN DE ESFERICIDAD:**

$$\varphi = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$$

$$\varphi_1 = \sqrt{\frac{684.47 \mu m}{876.83 \mu m}} = 0.88$$

$$\varphi_2 = \sqrt{\frac{924.50 \mu m}{1318.63 \mu m}} = 0.84$$

$$\varphi_3 = \sqrt{\frac{498.11 \mu m}{759.69 \mu m}} = 0.81$$

$$\varphi_4 = \sqrt{\frac{480.03 \mu m}{797.81 \mu m}} = 0.78$$

$$\varphi_5 = \sqrt{\frac{306.24 \mu m}{463.31 \mu m}} = 0.81$$

$$\varphi_{Prom} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_5}{5}$$

$$\varphi_{Prom} = \frac{0.88 \mu m + 0.84 \mu m + 0.81 \mu m + 0.78 \mu m + 0.81 \mu m}{5}$$

$$\varphi_{Prom} = 0.82$$

**Dónde:**

$\varphi_{Prom}$  = Esfericidad promedio

$\varphi_1$  = Esfericidad muestra 1

$\varphi_2$  = Esfericidad muestra 2

$\varphi_3$  = Esfericidad muestra 3

$\varphi_4$  = Esfericidad muestra 4

$\varphi_5$  = Esfericidad muestra 5

$C_2$  = Diámetro interno ( $\mu m$ )

$C_1$  = Diámetro externo ( $\mu m$ )

### **ENSAYO: MICROSCOPIO DE BARRIDO**

Al haber realizado el análisis del *Piroclasto Volcánico* y haber obtenido en el software SEM, se logró una magnificación de 81x, en el cual se logra detallar con mayor exactitud la sustancia reactiva.

## ZEOLITA CLINOPTILOLITA

Figura 21. Fotografía Zeolita Clinoptilolita



Elaborado por: Ana María Amaya Díaz

## ENSAYO: GRANULOMETRÍA

### ▪ CÁLCULO DEL ERROR:

$$Err = \frac{\text{Peso inicial de suelo} - \text{Peso acumulado en tamices}}{\text{Peso inicial de suelo}} * 100\%$$

$$Err = \frac{1000 \text{ gr} - 998.70 \text{ gr}}{1000 \text{ gr}} * 100\%$$

$$Err = 0.13 \%$$

*Dónde:*

*Err = Porcentaje de error (%)*

### ▪ CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$Cu = \frac{0.98 \text{ mm}}{0.72 \text{ mm}}$$

$$Cu = 1.36$$

**Dónde:**

$Cu$  = Coeficiente de uniformidad

$D_{60}$  = Tamaño correspondiente del 60% (mm)

$D_{10}$  = Tamaño correspondiente del 10% (mm)

▪ **CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CURVATURA**

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}}$$

$$Cc = \frac{(0.79 \text{ mm})^2}{0.98 \text{ mm} * 0.72 \text{ mm}}$$

$$Cc = 0.88$$

**Dónde:**

$Cc$  = Coeficiente de curvatura

$D_{60}$  = Tamaño correspondiente del 60% (mm)

$D_{30}$  = Tamaño correspondiente del 30% (mm)

$D_{10}$  = Tamaño correspondiente del 10% (mm)

**ENSAYO: PERMEABILIDAD**

▪ **DETERMINACIÓN TIEMPO:**

$$t = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5}$$

$$t = \frac{5.35 \text{ seg} + 5.36 \text{ seg} + 5.99 \text{ seg} + 5.20 \text{ seg} + 6.12 \text{ seg}}{5}$$

$$t = 5.60 \text{ seg}$$

**Dónde:**

$t =$  Tiempo (seg)

$t_1 =$  Tiempo 1 (seg)

$t_2 =$  Tiempo 2 (seg)

$t_3 =$  Tiempo 3 (seg)

$t_4 =$  Tiempo 4 (seg)

$t_5 =$  Tiempo 5 (seg)

▪ **DETERMINACIÓN ÁREA TRANSVERSAL:**

$$A = \frac{\pi * D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi * (6.40 \text{ cm})^2}{4}$$

$$A = 32.17 \text{ cm}^2$$

**Dónde:**

$A =$  Área ( $\text{cm}^2$ )

$\pi =$  Pi

$D =$  Diámetro (cm)

▪ **DETERMINACIÓN COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD:**

$$k = \frac{V * L}{A * t * h}$$

$$k = \frac{25.00 \text{ cm}^3 * 6.90 \text{ cm}}{32.17 \text{ cm}^2 * 5.60 \text{ seg} * 68.50 \text{ cm}}$$

$$k = 0.01398 \text{ cm/seg}$$

**NOTA:** Al haber obtenido el coeficiente de permeabilidad, se procede a la transformación del coeficiente a notación científica.

$$k = 1.40 \times 10^{-2} \text{ cm/seg}$$

**Dónde:**

$k$  = Coeficiente de Permeabilidad (cm/seg)

$V$  = Volumen ( $\text{cm}^3$ )

$L$  = Longitud (cm)

$A$  = Área ( $\text{cm}^2$ )

$t$  = Tiempo (seg)

$h$  = Altura (cm)

### ENSAYO: COMPACIDAD

▪ **DETERMINACIÓN VOLUMEN:**

$$Vol = \pi * r^2 * h$$

$$Vol = \pi * (4.00 \text{ cm})^2 * 16.40 \text{ cm}$$

$$Vol = 824.35 \text{ cm}^3$$

**Dónde:**

$V$  = Volumen ( $\text{cm}^3$ )

$\pi$  = Pi

$r$  = Radio (cm)

$h$  = Altura (cm)

▪ **DETERMINACIÓN DENSIDAD:**

$$D = \frac{Masa}{Volumen}$$

$$D = \frac{777.60 \text{ gr}}{824.35 \text{ cm}^3}$$

$$D = 0.94 \text{ gr/cm}^3$$

**Dónde:**

$D$  = Densidad ( $\text{gr/cm}^3$ )

$M = \text{Masa (gr)}$

$V = \text{Volumen (cm}^3\text{)}$

▪ **DETERMINACIÓN COEFICIENTE DE VACÍOS:**

$$e = \frac{\text{Peso Específico}}{\text{Peso Unitario}}$$

$$e = \frac{2.03 \text{ gr/cm}^3}{2.44 \text{ gr/cm}^3}$$

$$e = 0.83$$

**Dónde:**

$e = \text{Coeficiente de vacíos}$

▪ **DETERMINACIÓN COEFICIENTE DE COMPACIDAD:**

$$Cr = \frac{e_{\text{máx}} - e}{e_{\text{máx}} - e_{\text{mín}}} * 100\%$$

$$Cr = \frac{2.05 - 2.03}{2.05 - 2.02} * 100\%$$

$$Cr = 66.67 \%$$

**Dónde:**

$Cr = \text{Coeficiente de compacidad}$

$e = \text{Coeficiente de vacíos}$

$e_{\text{máx}} = \text{Coeficiente de vacíos máxima}$

$e_{\text{mín}} = \text{Coeficiente de vacíos mínima}$

### ENSAYO: TAMAÑO ESPECÍFICO

**Peso Retenido** = 1000.00 gr

$$TNM = \text{Peso Retenido} * 5\%$$

$$TNM = 1000.00 \text{ gr} * 5\%$$

$$TNM = 50.00$$

El *tamaño nominal máximo* se encuentra en el Tamiz #40 (0.43mm) con un valor de 56.70 gr.

**Dónde:**

**TNM** = *Tamaño nominal máximo (gr)*

### ENSAYO: POROSIDAD

$$n = \frac{n_1 + n_2}{2} * 100\%$$

$$n = \frac{32.90 + 37.70}{2} * 100\%$$

$$n = 35.30 \%$$

**Dónde:**

**n** = *Porosidad (%)*

**n<sub>1</sub>** = *Porosidad muestra 1 (%)*

**n<sub>2</sub>** = *Porosidad muestra 2 (%)*

### ENSAYO: ESFERICIDAD

▪ **DETERMINACIÓN DE ESFERICIDAD:**

$$\phi = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$$

$$\varphi_1 = \sqrt{\frac{395.26 \mu m}{533.35 \mu m}} = 0.86$$

$$\varphi_2 = \sqrt{\frac{504.99 \mu m}{659.31 \mu m}} = 0.88$$

$$\varphi_3 = \sqrt{\frac{391.88 \mu m}{548.30 \mu m}} = 0.85$$

$$\varphi_4 = \sqrt{\frac{375.13 \mu m}{608.35 \mu m}} = 0.79$$

$$\varphi_5 = \sqrt{\frac{643.13 \mu m}{830.46 \mu m}} = 0.88$$

$$\varphi_{Prom} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_5}{5}$$

$$\varphi_{Prom} = \frac{0.86 + 0.88 + 0.85 + 0.79 + 0.88}{5}$$

$$\varphi_{Prom} = 0.85$$

**Dónde:**

$\varphi_{Prom}$  = Esfericidad promedio

$\varphi_1$  = Esfericidad muestra 1

$\varphi_2$  = Esfericidad muestra 2

$\varphi_3$  = Esfericidad muestra 3

$\varphi_4$  = Esfericidad muestra 4

$\varphi_5$  = Esfericidad muestra 5

$C_2$  = Diámetro interno ( $\mu m$ )

$C_1$  = Diámetro externo ( $\mu m$ )

## **ENSAYO: MICROSCOPIO DE BARRIDO**

Al haber realizado el análisis de la *Zeolita Clinoptilolita* y haber obtenido en el software SEM, se logró una magnificación de 96x, en el cual se logra detallar con mayor exactitud la sustancia reactiva.

## ZEOLITA MORDENITA

Figura 22. Fotografía Zeolita Mordenita



Elaborado por: Ana María Amaya Díaz

## ENSAYO: GRANULOMETRÍA

### ▪ CÁLCULO DEL ERROR:

$$Err = \frac{\text{Peso inicial de suelo} - \text{Peso acumulado en tamices}}{\text{Peso inicial de suelo}} * 100\%$$

$$Err = \frac{6000 \text{ gr} - 5869.70 \text{ gr}}{6000 \text{ gr}} * 100\%$$

$$Err = 2.17 \%$$

**Dónde:**

**Err** = Porcentaje de error (%)

### ▪ CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$Cu = \frac{0.98 \text{ mm}}{0.72 \text{ mm}}$$

$$Cu = 1.36$$

**Dónde:**

$Cu$  = Coeficiente de uniformidad

$D_{60}$  = Tamaño correspondiente del 60% (mm)

$D_{10}$  = Tamaño correspondiente del 10% (mm)

▪ **CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CURVATURA**

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}}$$

$$Cc = \frac{(6.80 \text{ mm})^2}{11.00 \text{ mm} * 2.00 \text{ mm}}$$

$$Cc = 2.10$$

**Dónde:**

$Cc$  = Coeficiente de curvatura

$D_{60}$  = Tamaño correspondiente del 60% (mm)

$D_{30}$  = Tamaño correspondiente del 30% (mm)

$D_{10}$  = Tamaño correspondiente del 10% (mm)

**ENSAYO: PERMEABILIDAD**

▪ **DETERMINACIÓN TIEMPO:**

$$t = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5}$$

$$t = \frac{7.80 \text{ seg} + 7.58 \text{ seg} + 7.48 \text{ seg} + 7.69 \text{ seg} + 7.59 \text{ seg}}{5}$$

$$t = 7.63 \text{ seg}$$

**Dónde:**

$t = \text{Tiempo (seg)}$

$t_1 = \text{Tiempo 1 (seg)}$

$t_2 = \text{Tiempo 2 (seg)}$

$t_3 = \text{Tiempo 3 (seg)}$

$t_4 = \text{Tiempo 4 (seg)}$

$t_5 = \text{Tiempo 5 (seg)}$

▪ **DETERMINACIÓN ÁREA TRANSVERSAL:**

$$A = \frac{\pi * D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi * (6.40 \text{ cm})^2}{4}$$

$$A = 32.17 \text{ cm}^2$$

**Dónde:**

$A = \text{Área (cm}^2\text{)}$

$\pi = \text{Pi}$

$D = \text{Diámetro (cm)}$

▪ **DETERMINACIÓN COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD:**

$$k = \frac{V * L}{A * t * h}$$

$$k = \frac{25.00 \text{ cm}^3 * 6.90 \text{ cm}}{32.17 \text{ cm}^2 * 7.63 \text{ seg} * 68.50 \text{ cm}}$$

$$k = 0.01026 \text{ cm/seg}$$

**NOTA:** Al haber obtenido el coeficiente de permeabilidad, se procede a la transformación del coeficiente a notación científica.

$$k = 1.03 \times 10^{-2} \text{ cm/seg}$$

**Dónde:**

$k$  = Coeficiente de Permeabilidad (cm/seg)

$V$  = Volumen ( $\text{cm}^3$ )

$L$  = Longitud (cm)

$A$  = Área ( $\text{cm}^2$ )

$t$  = Tiempo (seg)

$h$  = Altura (cm)

### ENSAYO: COMPACIDAD

▪ **DETERMINACIÓN VOLUMEN:**

$$Vol = \pi * r^2 * h$$

$$Vol = \pi * (4.00 \text{ cm})^2 * 16.40 \text{ cm}$$

$$Vol = 824.35 \text{ cm}^3$$

**Dónde:**

$V$  = Volumen ( $\text{cm}^3$ )

$\pi$  = Pi

$r$  = Radio (cm)

$h$  = Altura (cm)

▪ **DETERMINACIÓN DENSIDAD:**

$$D = \frac{Masa}{Volumen}$$

$$D = \frac{842.50 \text{ gr}}{824.35 \text{ cm}^3}$$

$$D = 1.02 \text{ gr/cm}^3$$

**Dónde:**

$D = \text{Densidad (gr/cm}^3\text{)}$

$M = \text{Masa (gr)}$

$V = \text{Volumen (cm}^3\text{)}$

▪ **DETERMINACIÓN COEFICIENTE DE VACÍOS:**

$$e = \frac{\text{Peso Específico}}{\text{Peso Unitario}}$$

$$e = \frac{2.07 \text{ gr/cm}^3}{1.23 \text{ gr/cm}^3}$$

$$e = 1.68$$

**Dónde:**

$e = \text{Coeficiente de vacíos}$

▪ **DETERMINACIÓN COEFICIENTE DE COMPACIDAD:**

$$Cr = \frac{e_{\text{máx}} - e}{e_{\text{máx}} - e_{\text{min}}} * 100\%$$

$$Cr = \frac{2.09 - 2.07}{2.09 - 2.03} * 100\%$$

$$Cr = 33.33 \%$$

**Dónde:**

$Cr = \text{Coeficiente de compacidad}$

$e = \text{Coeficiente de vacíos}$

$e_{\text{máx}} = \text{Coeficiente de vacíos máxima}$

$e_{\text{min}} = \text{Coeficiente de vacíos mínima}$

### ENSAYO: TAMAÑO ESPECÍFICO

**Peso Retenido** = 846.60 gr

$$TNM = \text{Peso Retenido} * 5\%$$

$$TNM = 846.60 \text{ gr} * 5\%$$

$$TNM = 42.33$$

El *tamaño nominal máximo* se encuentra en el Tamiz #40 (0.43mm) con un valor de 65.00 gr.

**Dónde:**

**TNM** = *Tamaño nominal máximo (gr)*

### ENSAYO: POROSIDAD

$$n = \frac{n_1 + n_2}{2} * 100\%$$

$$n = \frac{33.90 + 32.20}{2} * 100\%$$

$$n = 33.05 \%$$

**Dónde:**

**n** = *Porosidad (%)*

**n<sub>1</sub>** = *Porosidad muestra 1 (%)*

**n<sub>2</sub>** = *Porosidad muestra 2 (%)*

## ENSAYO: ESFERICIDAD

### ▪ DETERMINACIÓN DE ESFERICIDAD:

$$\varphi = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$$

$$\varphi_1 = \sqrt{\frac{958.58 \mu m}{2126.79 \mu m}} = 0.67$$

$$\varphi_2 = \sqrt{\frac{398.12 \mu m}{694.40 \mu m}} = 0.76$$

$$\varphi_3 = \sqrt{\frac{540.43 \mu m}{773.87 \mu m}} = 0.84$$

$$\varphi_4 = \sqrt{\frac{334.43 \mu m}{1067.93 \mu m}} = 0.56$$

$$\varphi_5 = \sqrt{\frac{688.46 \mu m}{1244.27 \mu m}} = 0.74$$

$$\varphi_{Prom} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_5}{5}$$

$$\varphi_{Prom} = \frac{0.67 + 0.76 + 0.84 + 0.56 + 0.74}{5}$$

$$\varphi_{Prom} = 0.71$$

**Dónde:**

$\varphi_{Prom}$  = Esfericidad promedio

$\varphi_1$  = Esfericidad muestra 1

$\varphi_2$  = Esfericidad muestra 2

$\varphi_3$  = Esfericidad muestra 3

$\varphi_4$  = Esfericidad muestra 4

$\varphi_5$  = Esfericidad muestra 5

$C_2$  = Diámetro interno ( $\mu\text{m}$ )

$C_1$  = Diámetro externo ( $\mu\text{m}$ )

### **ENSAYO: MICROSCOPIO DE BARRIDO**

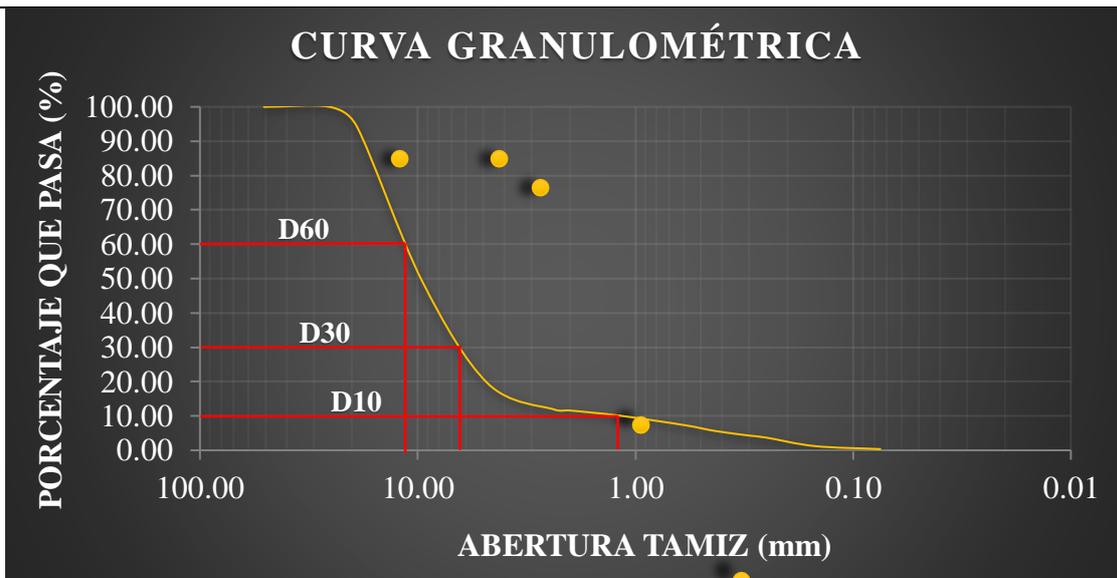
Al haber realizado el análisis de la *Zeolita Mordenita* y haber obtenido en el software SEM, se logró una magnificación de 38x, en el cual se logra detallar con mayor exactitud la sustancia reactiva.

### 3. CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Análisis y discusión de los resultados

A continuación, se ha realizado una matriz de los resultados obtenidos para la determinación de las características físicas de las sustancias reactivas para el tratamiento del agua.

| <b>ZEOLITA CLINOPTILOLITA</b>   |           |  |                                    |                       |                       |
|---|-----------|--|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|  |           |  |                                    |                       |                       |
| <b>ENSAYO: GRANULOMETRÍA</b>  |           |  |                                    |                       |                       |
| <b>Tabla 9. Granulometría Piroclasto Volcánico</b>                                |           |  |                                    |                       |                       |
| <b>TAMIZ #</b>  | <b>mm</b> | <b>PESO<br/>RETENIDO<br/>(gr)</b>  | <b>PESO<br/>RET/ACUM.<br/>(gr)</b> | <b>%<br/>RETENIDO</b> | <b>% QUE<br/>PASA</b> |
| <b>2"</b>   | 50.80     | 0.00   | 0.00                               | 0.00                  | 100.00                |
| <b>1"</b>   | 25.40     | 0.00   | 0.00                               | 0.00                  | 100.00                |
| <b>3/4"</b>   | 19.05     | 289.30   | 289.30                             | 5.65                  | 94.35                 |
| <b>3/8"</b>   | 9.53      | 2311.40  | 2600.70                            | 50.81                 | 49.19                 |
| <b>#4</b>   | 4.76      | 1522.80  | 4123.50                            | 80.56                 | 19.44                 |
| <b>PASA #4</b>  |           | 1696.80  | 1000.00                            | 19.54                 |                       |
| <b>#8</b>   | 2.36      | 392.60   | 392.60                             | 7.67                  | 11.87                 |
| <b>#10</b>  | 2.00      | 13.90  | 406.50                             | 7.94                  | 11.60                 |
| <b>#16</b>  | 1.18      | 77.30  | 483.80                             | 9.45                  | 10.08                 |
| <b>#30</b>  | 0.60      | 139.30   | 623.10                             | 12.17                 | 7.36                  |
| <b>#40</b>  | 0.43      | 89.00  | 712.10                             | 13.91                 | 5.62                  |
| <b>#50</b>  | 0.30      | 68.60  | 780.70                             | 15.25                 | 4.28                  |
| <b>#60</b>  | 0.25      | 30.40  | 811.10                             | 15.85                 | 3.69                  |
| <b>#100</b>   | 0.15      | 126.30   | 937.40                             | 18.31                 | 1.22                  |
| <b>#200</b>   | 0.075     | 45.00  | 982.40                             | 19.19                 | 0.34                  |
| <b>PASA<br/>#200</b>  |           | 12.60  | 995.00                             | 19.44                 |                       |
| <b>TOTAL</b>  |           | 5118.50  | 5118.50                            |                       |                       |
| <b>Elaborado por: Ana María Amaya Díaz</b>  |           |  |                                    |                       |                       |



**Tabla 10. Características y propiedades del Piroclasto Volcánico**

| TAMAÑO NOMINAL MÁXIMO (mm) | DIÁMETRO EFECTIVO (mm) | DIÁMETRO EQUIPARABLE (mm) | DIÁMETRO DIMENSIONAL (mm) | COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD ( $C_u$ ) | COEFICIENTE DE CURVATURA ( $C_c$ ) |
|----------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 0.43<br>Tamiz #40          | 1.10                   | 7.22                      | 11.00                     | 10.00                                | 4.31                               |

**Elaborado por:** Ana María Amaya Díaz

Torres expone que, al realizar un estudio de aguas provenientes de lavadoras y lubricadoras de autos en Ambato-Ecuador, se ha enfocado en material grueso, en el cual dicho análisis demuestra una curva granulométrica con un tamaño nominal máximo en el tamiz #3/8". [37]

## ENSAYO: PERMEABILIDAD

**Tabla 11. Coeficiente de Permeabilidad del Piroclasto Volcánico**

| <b>COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD</b>                    |                       |
|--|-----------------------|
| <b>VOLUMEN MEDIO (cm<sup>3</sup>)</b>                  | 25.00                 |
| <b>LONGITUD DE LA MUESTRA (cm)</b>                     | 6.90                  |
| <b>ÁREA TRANSVERSAL DE LA MUESTRA (cm<sup>2</sup>)</b> | 32.17                 |
| <b>DIÁMETRO INTERIOR DEL PERMEÁMETRO (cm)</b>          | 6.40                  |
| <b>TIEMPO DE LA PRUEBA (seg)</b>                       | 4.17                  |
| <b>ALTURA DE CARGA HIDRÁULICA (cm)</b>                 | 68.50                 |
| <b>COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (cm/seg)</b>           | $1.88 \times 10^{-2}$ |

Elaborado por: Ana María Amaya Díaz

**Tabla 12. Permeabilidad Relativa Piroclasto Volcánico**

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| <b>MUY PERMEABLES GRUESA</b>  | Mayor de $10^{-1}$ Grava                 |
| <b>PERMEABILIDAD MEDIA</b>    | $10^{-1} - 10^{-3}$ arenas, arenas finas |
| <b>BAJA PERMEABILIDAD</b>     | $10^{-3} - 10^{-5}$ arena limosa, sucia  |
| <b>MUY BAJA PERMEABILIDAD</b> | $10^{-5} - 10^{-7}$ limos                |
| <b>IMPERMEABLE</b>            | $10^{-7} - 10^{-9}$ arcillas             |

Al obtener un resultado de  $1.88 \times 10^{-2}$  de permeabilidad, se observa que existe una permeabilidad media, en el cual la sustancia reactiva analizada está catalogada como arena, arena fina.

Según estudios realizados anteriormente en Chile, se analizó el comportamiento de suelos volcánicos para uso de material de filtro en depuración de aguas residuales, en el cual se determinó una permeabilidad de entre  $2.47 \times 10^{-3}$  y  $1.80 \times 10^{-4}$ . [48]

**ENSAYO: COMPACIDAD****Tabla 13. Gravedad Específica del Piroclasto Volcánico**

| <b>GRAVEDAD ESPECÍFICA</b>                       |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|
| <b>DETALLE</b>                                   | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> |
| <b>MASA DEL PICNÓMETRO<br/>+ AGUA (gr)</b>       | 555.00   | 556.10   | 555.63   |
| <b>MASA MUESTRA DE<br/>SUELO (gr)</b>            | 469.70   | 471.20   | 469.76   |
| <b>MASA DEL PICNÓMETRO<br/>+ AGUA+SUELO (gr)</b> | 600.00   | 601.30   | 601.42   |
| <b>MASA RECIPIENTE (gr)</b>                      | 263.80   | 263.80   | 263.80   |
| <b>MASA RECIPIENTE<br/>+MUESTRA SECA (gr)</b>    | 338.40   | 338.70   | 338.61   |
| <b>MASA MUESTRA SECA (gr)</b>                    | 75.00    | 76.00    | 75.20    |
| <b>GRAVEDAD ESPECÍFICA</b>                       | 2.50     | 2.47     | 2.56     |
|  | 2.51     |          |          |

Elaborado por: Ana María Amaya Díaz

**Tabla 14. Peso Unitario y Coeficiente de Compacidad del Piroclasto Volcánico**

| <b>SUSTANCIA<br/>REACTIVA (gr)</b>         | <b>SUSTANCIA<br/>REACTIVA +<br/>RECIPIENTE (gr)</b> | <b>PESO<br/>UNITARIO<br/>(gr/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>PESO UNITARIO<br/>PROMEDIO<br/>(gr/cm<sup>3</sup>)</b> |
|--|---|--|---|
| 801.20                                     | 2564.00   | 2.89   | 2.88  |
| 804.01                                     | 2573.02   | 2.86   |   |
| 803.33                                     | 2565.84   | 2.89   |   |
| 802.11                                     | 2571.06   | 2.89   |   |
| 801.97                                     | 2564.47   | 2.89   |   |
| <b>PESO RECIPIENTE (gr)</b>                |   | 1762.80  |   |
| <b>VOLUMEN RECIPIENTE (cm<sup>3</sup>)</b> |   | 824.35   |   |
| <b>COEFICIENTE DE COMPACIDAD (%)</b>       |   | 76.92  |   |

Elaborado por: Ana María Amaya Díaz

La compacidad obtenida es de 76.92% por lo tanto, como se observa en la *Tabla 15* el Piroclasto Volcánico se clasifica como un suelo de compacidad densa.

**Tabla 15. Compacidad Relativa del Piroclasto Volcánico**

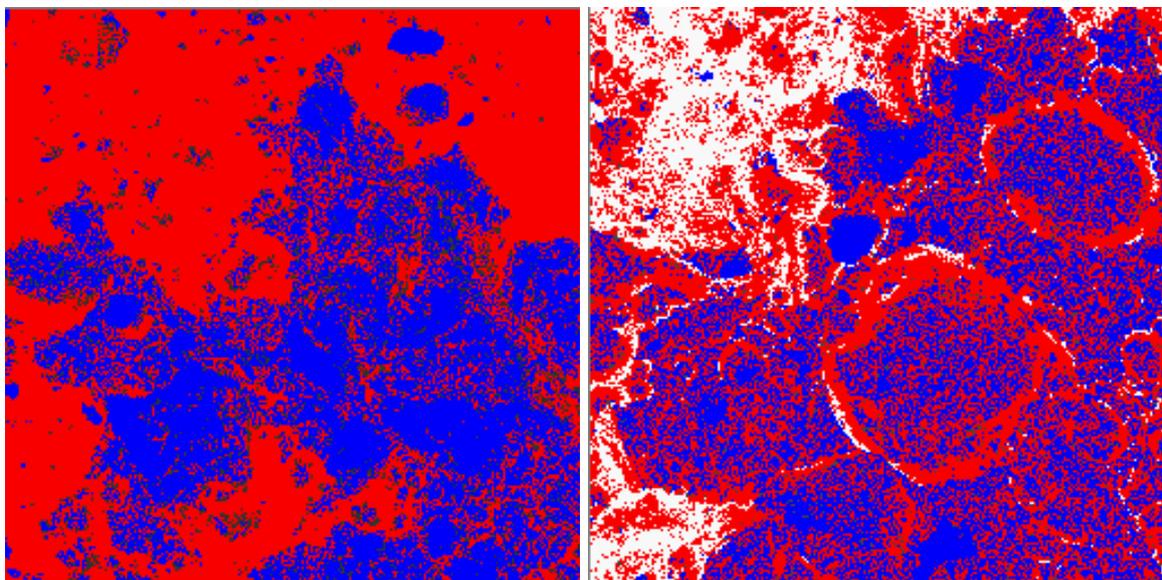
| <b>COMPACIDAD</b> | <b>COMPACIDAD RELATIVA %</b> |
|-------------------|------------------------------|
| Muy suelta        | 0-15                         |
| Suelta            | 15-35                        |
| Media             | 35-65                        |
| Densa             | 65-85                        |
| Muy Densa         | 85-100                       |

**Fuente:**[49]

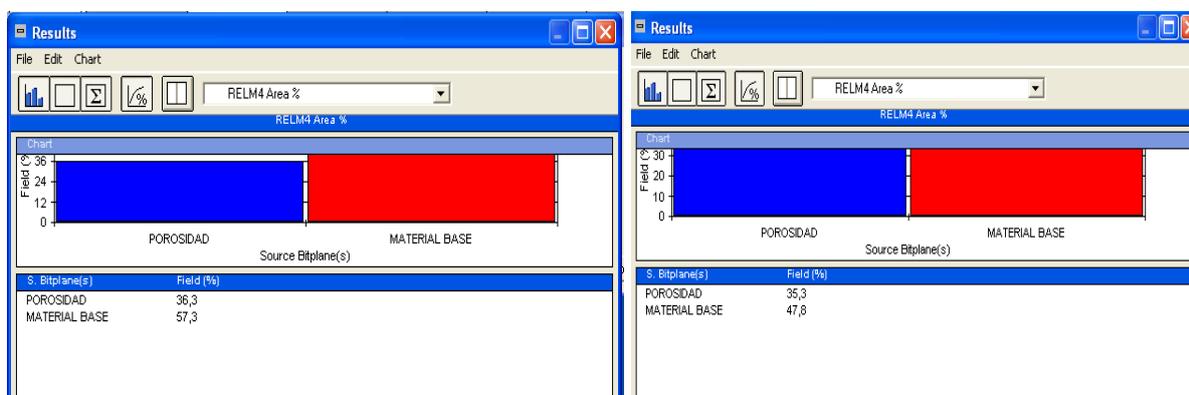
En la Pontificia Universidad Católica de Chile, se menciona que al realizar análisis en materiales volcánicos se determina una compacidad relativa del 70%, en el cual en la *Tabla 15* determina una compacidad densa. [48]

## ENSAYO: POROSIDAD

**Figura 23. Fotografía Clemex Vision del Piroclasto Volcánico**



**Figura 24. Tabla Clemex Vision del Piroclasto Volcánico**

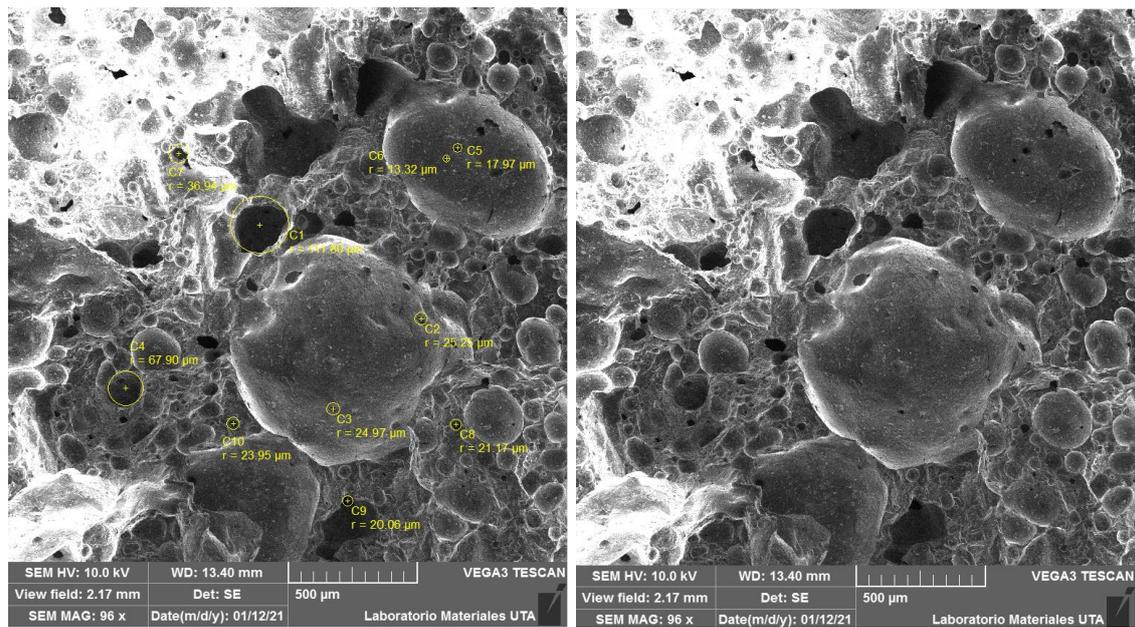


Al haber utilizado las imágenes del Microscopio de Barrido e introducirlas en el software *Clemex Vision*, se observa que el Piroclasto Volcánico arroja un valor del 35.80% de porosidad.

Al obtener resultados de porosidad según [48], expone un resultado del 36%, obteniendo un resultado similar utilizando el software *Clemex Vision*.

A continuación, se ha realizado un análisis más profundo y detallado para la obtención del diámetro promedio de la sustancia reactiva.

**Figura 25. Fotografía diámetro del Piroclasto Volcánico**



**Tabla 16. Diámetro promedio del Piroclasto Volcánico**

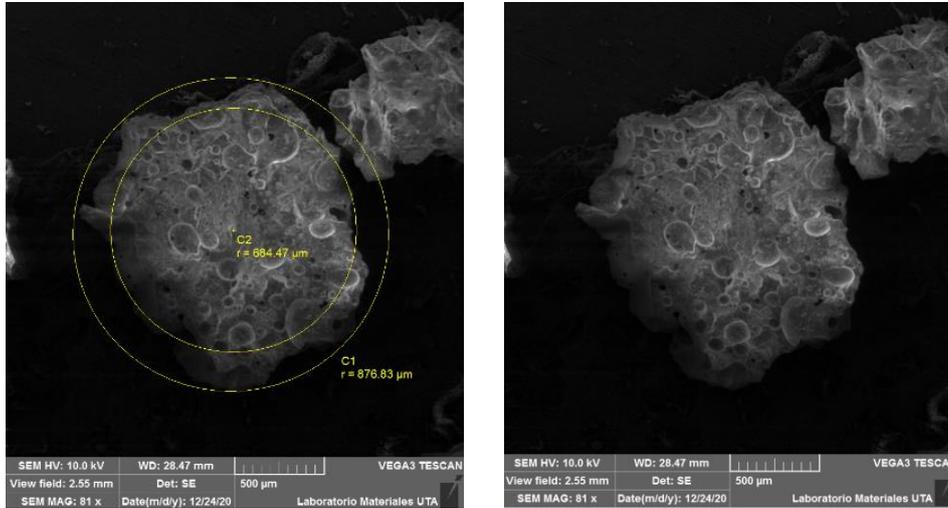
| <b>CIRCUNFERENCIA</b> | <b>RADIO DEL PORO (μm)</b> | <b>DIÁMETRO DEL PORO (μm)</b> | <b>DIÁMETRO PROMEDIO DE POROS (μm)</b> |
|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|--|
| <b>C1</b>             | 111.80                     | 223.60                        | 72.67                                  |
| <b>C2</b>             | 25.25                      | 50.50                         |  |
| <b>C3</b>             | 24.97                      | 49.94                         |  |
| <b>C4</b>             | 67.90                      | 135.80                        |  |
| <b>C5</b>             | 17.97                      | 35.94                         |  |
| <b>C6</b>             | 13.32                      | 26.64                         |  |
| <b>C7</b>             | 36.94                      | 73.88                         |  |
| <b>C8</b>             | 21.17                      | 42.34                         |  |
| <b>C9</b>             | 20.06                      | 40.12                         |  |
| <b>C10</b>            | 23.95                      | 47.90                         |  |

**Elaborado por:** Ana María Amaya Díaz

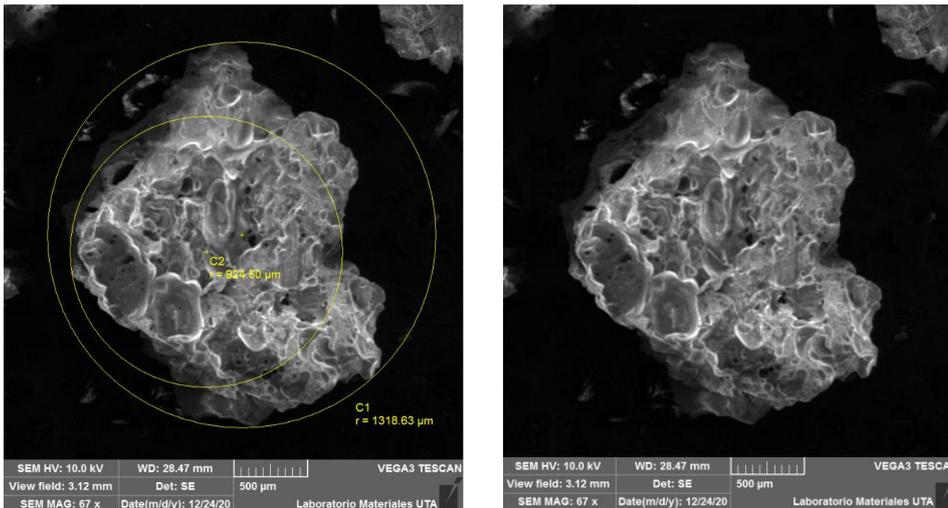
Por lo tanto, si clasificamos el rango de poros que se encuentran en la sustancia reactiva según la *Tabla 3*, se obtienen microporos.

## ENSAYO: ESFERICIDAD

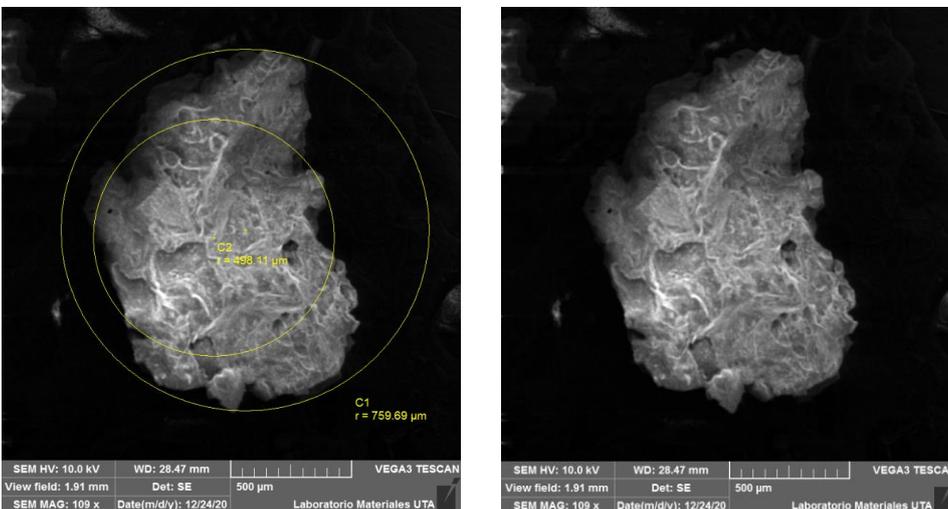
**Figura 26. Esfericidad Piroclasto Volcánico, muestra 1**



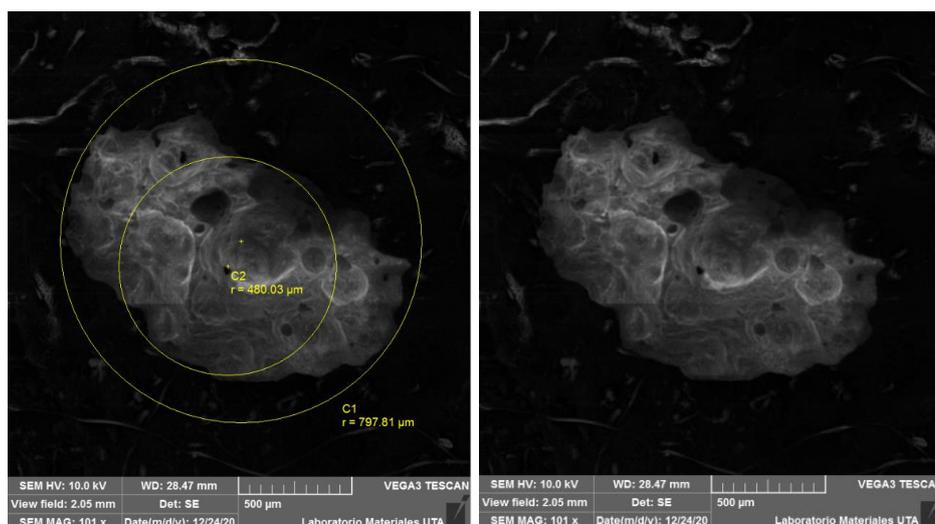
**Figura 27. Esfericidad Piroclasto Volcánico, muestra 2**



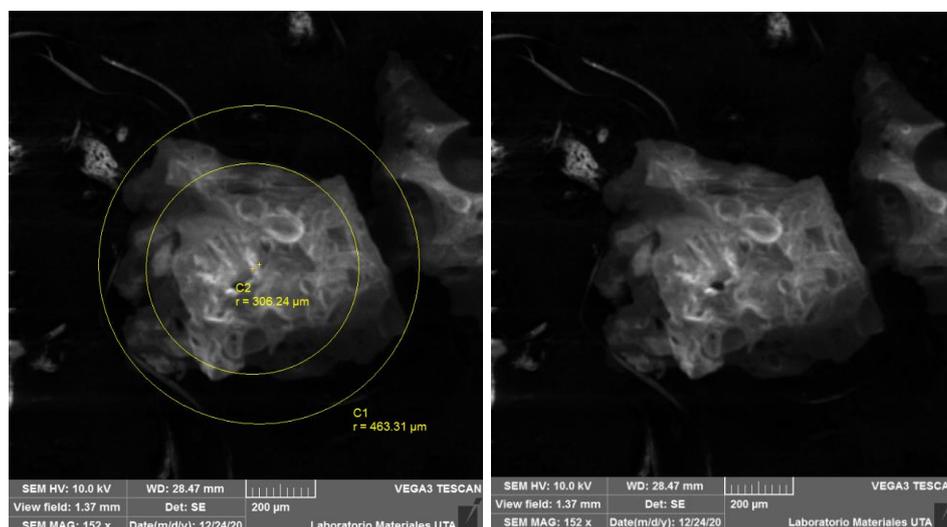
**Figura 28. Esfericidad Piroclasto Volcánico, muestra 3**



**Figura 29. Esfericidad Piroclasto Volcánico, muestra 4**



**Figura 30. Esfericidad Piroclasto Volcánico, muestra 5**



**Tabla 17. Esfericidad Promedio del Piroclasto Volcánico**

| MUESTRA | DIÁMETRO INTERIOR – C2 (μm) | DIÁMETRO EXTERIOR – C1 (μm) | ESFERICIDAD | ESFERICIDAD PROMEDIO |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|-------------|----------------------|
| 1       | 684.47                      | 876.83                      | 0.88        | 0.82                 |
| 2       | 924.50                      | 1318.63                     | 0.84        |                      |
| 3       | 498.11                      | 759.69                      | 0.81        |                      |
| 4       | 480.03                      | 797.81                      | 0.78        |                      |
| 5       | 306.24                      | 463.31                      | 0.81        |                      |

**Elaborado por: Ana María Amaya Díaz**

**Tabla 18. Criterios y valores de Esfericidad**

| <b>REDONDEZ</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>   | <b>VALOR</b> | <b>PROMEDIO</b> |
|-----------------|--|--------------|-----------------|
| Muy Angular     | Superficies fracturadas y múltiples bordes afilados.                       | 0.12 a 0.17  | 0.14            |
| Angular         | Bordes afilados y formas prismáticas                                       | 0.17 a 0.25  | 0.21            |
| Sub Angular     | Esquinas y bordes ligeramente redondeados.                                 | 0.25 a 0.35  | 0.30            |
| Sub Redondeado  | Esquinas y bordes bien redondeados.  | 0.35 a 0.49  | 0.41            |
| Redondeado      | Partículas redondeadas con formas irregulares y no se distinguen esquinas. | 0.49 a 0.70  | 0.59            |
| Muy Redondeado  | Partículas esféricas o elípticas casi lisas.                               | 0.70 a 1.00  | 0.84            |

**Fuente:** [50]

Al obtener una esfericidad de 0.82 del Piroclasto Volcánico, se observa en la *Tabla 18* que la sustancia reactiva se clasifica como muy redondeado, siendo partícula esférica o elíptica casi lisa.

En Chile, al obtener resultados de esfericidad del suelo volcánico, mencionan que existe una morfología de forma esférica con pequeñas aberturas en el material volcánico [48]. En el cual según la *Tabla 18*, pertenece a un valor entre 0.70 a 1.00.

## ZEOLITA CLINOPTILOLITA

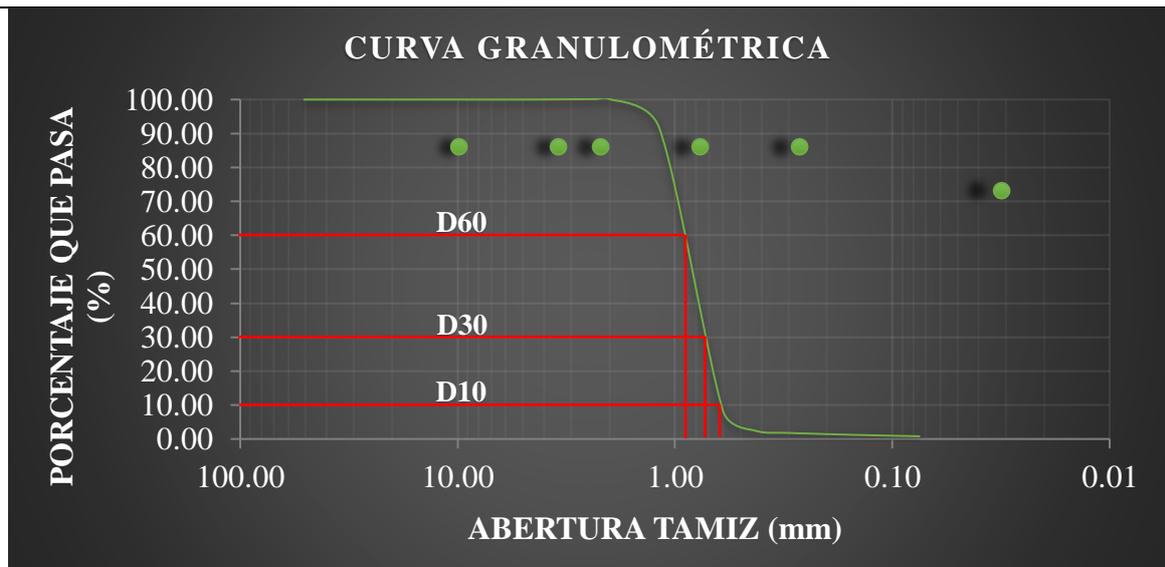


### ENSAYO: GRANULOMETRÍA

**Tabla 19. Granulometría Zeolita Clinoptilolita**

| TAMIZ #          | mm    | PESO<br>RETENIDO<br>(gr) | PESO<br>RET/ACUM.<br>(gr) | %<br>RETENIDO | % QUE<br>PASA |
|------------------|-------|--------------------------|---------------------------|---------------|---------------|
| 2"               | 50.80 | 0.00                     | 0.00                      | 0.00          | 100.00        |
| 1"               | 25.40 | 0.00                     | 0.00                      | 0.00          | 100.00        |
| 3/4"             | 19.05 | 0.00                     | 0.00                      | 0.00          | 100.00        |
| 3/8"             | 9.53  | 0.00                     | 0.00                      | 0.00          | 100.00        |
| #4               | 4.76  | 0.00                     | 0.00                      | 0.00          | 100.00        |
| <b>PASA #4</b>   |       | 1000.00                  | 1000.00                   | 100.13        |               |
| #8               | 2.36  | 0.00                     | 0.00                      | 0.00          | 100.13        |
| #10              | 2.00  | 0.00                     | 0.00                      | 0.00          | 100.13        |
| #16              | 1.18  | 84.90                    | 84.90                     | 8.50          | 91.63         |
| #30              | 0.60  | 833.40                   | 918.30                    | 91.95         | 8.18          |
| #40              | 0.43  | 56.70                    | 975.00                    | 97.63         | 2.50          |
| #50              | 0.30  | 7.00                     | 982.00                    | 98.33         | 1.80          |
| #60              | 0.25  | 1.70                     | 983.70                    | 98.50         | 1.63          |
| #100             | 0.15  | 4.20                     | 987.90                    | 98.92         | 1.21          |
| #200             | 0.075 | 4.10                     | 992.00                    | 99.33         | 0.80          |
| <b>PASA #200</b> |       | 6.70                     | 998.70                    | 100.00        |               |
| <b>TOTAL</b>     |       | 998.70                   | 998.70                    |               |               |

**Elaborado por: Ana María Amaya Díaz**



**Tabla 20. Características y propiedades de la Zeolita Clinoptilolita**

| TAMAÑO NOMINAL MÁXIMO (mm) | DIÁMETRO EFECTIVO (mm) | DIÁMETRO EQUIPARABLE (mm) | DIÁMETRO DIMENSIONAL (mm) | COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD (Cu) | COEFICIENTE DE CURVATURA (Cc) |
|----------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 0.43<br>Tamiz #40          | 0.72                   | 0.79                      | 0.98                      | 1.36                            | 0.88                          |

**Elaborado por:** Ana María Amaya Díaz

Al mencionar estudios anteriormente realizados, en Cuba se presenta que al utilizar una granulometría de partículas finas favorece a la adsorción de grandes compuestos y eliminación del agua contaminada, en el cual se ha utilizado material entre el tamiz #16, #30, #40, #50, #60. [51]

## ENSAYO: PERMEABILIDAD

**Tabla 21. Coeficiente de Permeabilidad de la Zeolita Clinoptilolita**

| COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD                      |                       |
|---|-----------------------|
| VOLUMEN MEDIO (cm <sup>3</sup> )                  | 25.00                 |
| LONGITUD DE LA MUESTRA (cm)                       | 6.90                  |
| ÁREA TRANSVERSAL DE LA MUESTRA (cm <sup>2</sup> ) | 32.17                 |
| DIÁMETRO INTERIOR DEL PERMEÁMETRO (cm)            | 6.40                  |
| TIEMPO DE LA PRUEBA (seg)                         | 5.60                  |
| ALTURA DE CARGA HIDRÁULICA (cm)                   | 68.50                 |
| COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (cm/seg)             | $1.40 \times 10^{-2}$ |

Elaborado por: Ana María Amaya Díaz

**Tabla 22. Permeabilidad Relativa Zeolita Clinoptilolita**

|                            |  |
|----------------------------|--|
| MUY PERMEABLES GRUESA      | Mayor de $10^{-1}$ Grava                 |
| <b>PERMEABILIDAD MEDIA</b> | $10^{-1} - 10^{-3}$ arenas, arenas finas |
| BAJA PERMEABILIDAD         | $10^{-3} - 10^{-5}$ arena limosa, sucia  |
| MUY BAJA PERMEABILIDAD     | $10^{-5} - 10^{-7}$ limos                |
| IMPERMEABLE                | $10^{-7} - 10^{-9}$ arcillas             |

Al obtener un resultado de  $1.40 \times 10^{-2}$  de permeabilidad, se observa que existe una permeabilidad media, en el cual la sustancia reactiva analizada está catalogada como arena, arena fina.

Rignack-Delgado expone el comportamiento de la Zeolita Clinoptilolita, en el cual se determina una permeabilidad media de entre  $1.89 \times 10^{-2}$  y  $2.03 \times 10^{-3}$ . [51]

**ENSAYO: COMPACIDAD**

**Tabla 23. Gravedad Específica Zeolita Clinoptilolita**

| <b>GRAVEDAD ESPECÍFICA</b>                       |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|
| <b>DETALLE</b>                                   | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> |
| <b>MASA DEL PICNÓMETRO<br/>+ AGUA (gr)</b>       | 664.60   | 665.90   | 664.93   |
| <b>MASA MUESTRA DE<br/>SUELO (gr)</b>            | 63.20    | 64.65    | 63.62    |
| <b>MASA DEL PICNÓMETRO<br/>+ AGUA+SUELO (gr)</b> | 727.80   | 730.55   | 728.55   |
| <b>MASA RECIPIENTE (gr)</b>                      | 187.30   | 187.30   | 187.30   |
| <b>MASA RECIPIENTE<br/>+MUESTRA SECA (gr)</b>    | 312.43   | 313.54   | 312.57   |
| <b>MASA MUESTRA SECA (gr)</b>                    | 125.13   | 126.24   | 125.27   |
| <b>GRAVEDAD ESPECÍFICA</b>                       | 2.02     | 2.050    | 2.03     |
|  |          | 2.03     |          |

**Elaborado por:** Ana María Amaya Díaz

En México Macías, expone que al realizar un análisis de la gravedad específica de la Zeolita Clinoptilolita, obtuvo un valor de 2.13. [52]

**Tabla 24. Peso Unitario y Coeficiente de Compacidad Zeolita Clinoptilolita**

| <b>SUSTANCIA<br/>REACTIVA (gr)</b>         | <b>SUSTANCIA<br/>REACTIVA +<br/>RECIPIENTE (gr)</b> | <b>PESO<br/>UNITARIO<br/>(gr/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>PESO UNITARIO<br/>PROMEDIO<br/>(gr/cm<sup>3</sup>)</b> |
|--|---|--|---|
| 777.60                                     | 2540.40   | 2.44   | 2.44  |
| 778.21                                     | 2541.01   | 2.44   |   |
| 776.93                                     | 2539.73   | 2.44   |   |
| 777.98                                     | 2540.78   | 2.44   |   |
| 778.02                                     | 2540.82   | 2.44   |   |
| <b>PESO RECIPIENTE (gr)</b>                |   | 1762.80  |   |
| <b>VOLUMEN RECIPIENTE (cm<sup>3</sup>)</b> |   | 824.35   |   |
| <b>COEFICIENTE DE COMPACIDAD (%)</b>       |   | 66.67  |   |

**Elaborado por:** Ana María Amaya Díaz

La compacidad obtenida es de 66.67% por lo tanto, como se observa en la *Tabla 25* la Zeolita Clinoptilolita se clasifica como un suelo de compacidad densa.

**Tabla 25. Compacidad Relativa de la Zeolita Clinoptilolita**

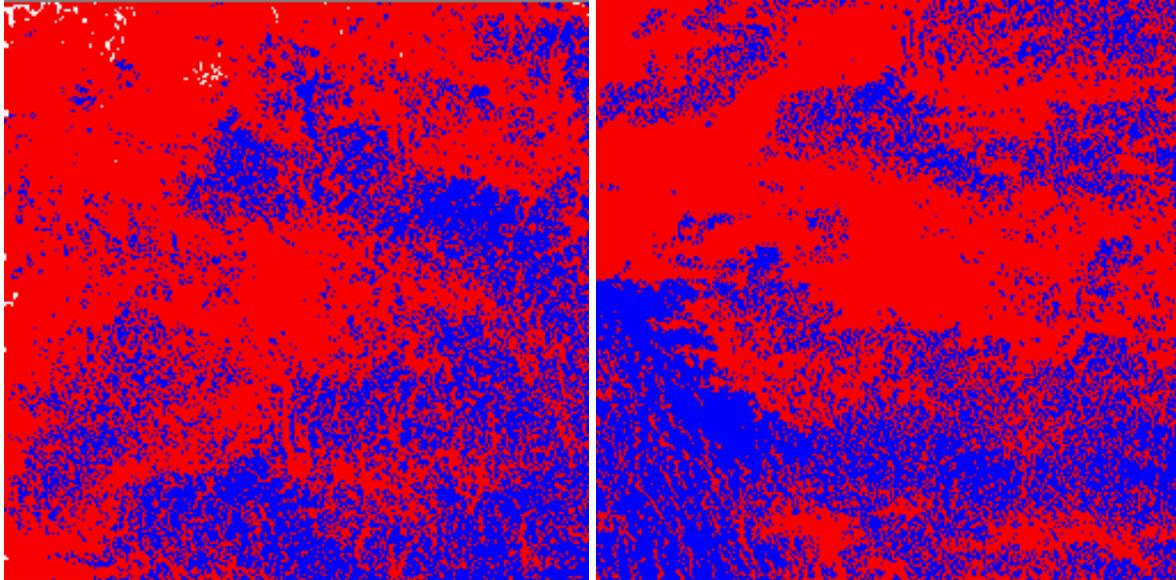
| <b>COMPACIDAD</b> | <b>COMPACIDAD RELATIVA %</b> |
|-------------------|------------------------------|
| Muy suelta        | 0-15                         |
| Suelta            | 15-35                        |
| Media             | 35-65                        |
| <b>Densa</b>      | <b>65-85</b>                 |
| Muy Densa         | 85-100                       |

**Fuente:**[49]

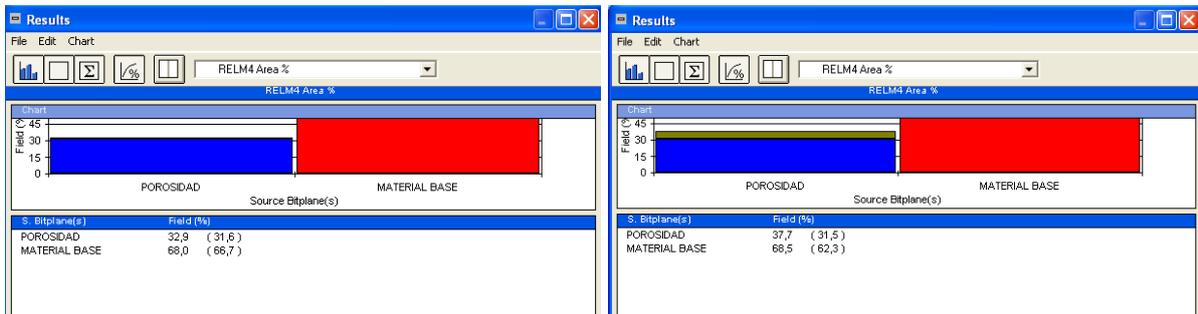
Estudios realizados en la ciudad de Cuba, demuestran que al utilizar una granulometría de partículas finas favorece a la adsorción compuestos y eliminación del agua contaminada, en el cual adquiere una compacidad Densa – Muy Densa. [51]

## ENSAYO: POROSIDAD

**Figura 31. Fotografía Clemex Vision de la Zeolita Clinoptilolita**



**Figura 32. Tabla Clemex Vision de la Zeolita Clinoptilolita**

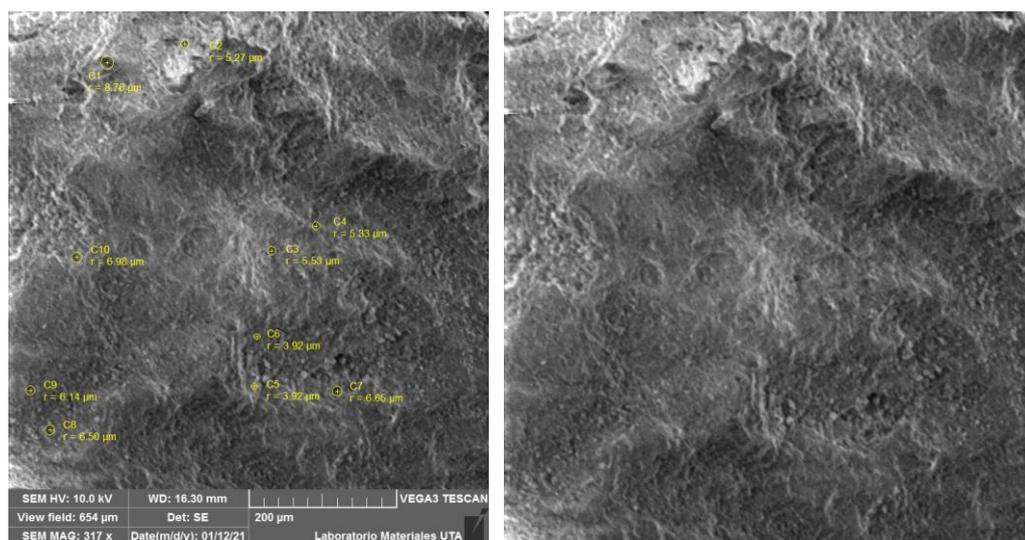


Al haber utilizado las imágenes del Microscopio de Barrido e introducir las en el software *Clemex Vision*, se observa que la Zeolita Clinoptilolita arroja un valor del 35.30% de porosidad.

Jiménez menciona que, al haber realizado estudios de porosidad de la Zeolita Clinoptilolita, obtiene un valor del 34.00%. [53]

A continuación, se ha realizado un análisis más profundo y detallado para la obtención del diámetro promedio de la sustancia reactiva.

**Figura 33. Fotografía diámetro de la Zeolita Clinoptilolita**



**Tabla 26. Diámetro promedio de la Zeolita Clinoptilolita**

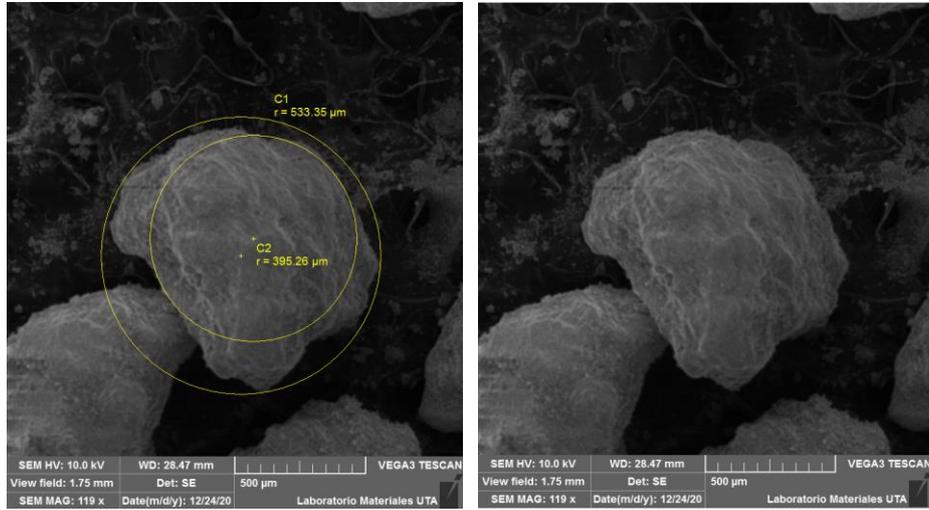
| CIRCUNFERENCIA | RADIO DEL PORO ( $\mu\text{m}$ ) | DIÁMETRO DEL PORO ( $\mu\text{m}$ ) | DIÁMETRO PROMEDIO DE POROS ( $\mu\text{m}$ ) |
|----------------|----------------------------------|-------------------------------------|--|
| C1             | 8.78                             | 17.56                               | 11.80  |
| C2             | 5.27                             | 10.54                               |  |
| C3             | 5.53                             | 11.06                               |  |
| C4             | 5.33                             | 10.66                               |  |
| C5             | 3.92                             | 7.84                                |  |
| C6             | 3.92                             | 7.84                                |  |
| C7             | 6.65                             | 13.3                                |  |
| C8             | 6.50                             | 13                                  |  |
| C9             | 6.14                             | 12.28                               |  |
| C10            | 6.98                             | 13.96                               |  |

**Elaborado por:** Ana María Amaya Díaz

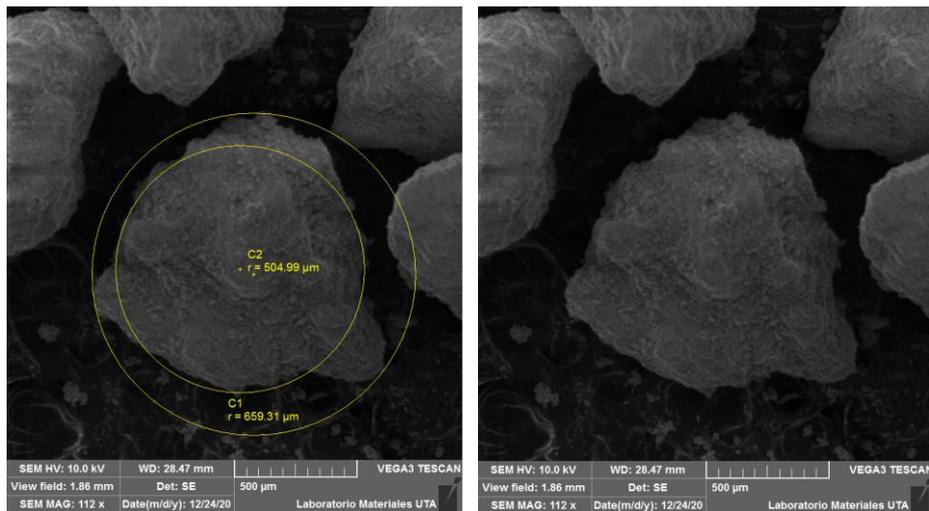
Por lo tanto, si clasificamos el rango de poros que se encuentran en la sustancia reactiva según la *Tabla 3.*, se obtienen microporos.

## ENSAYO: ESFERICIDAD

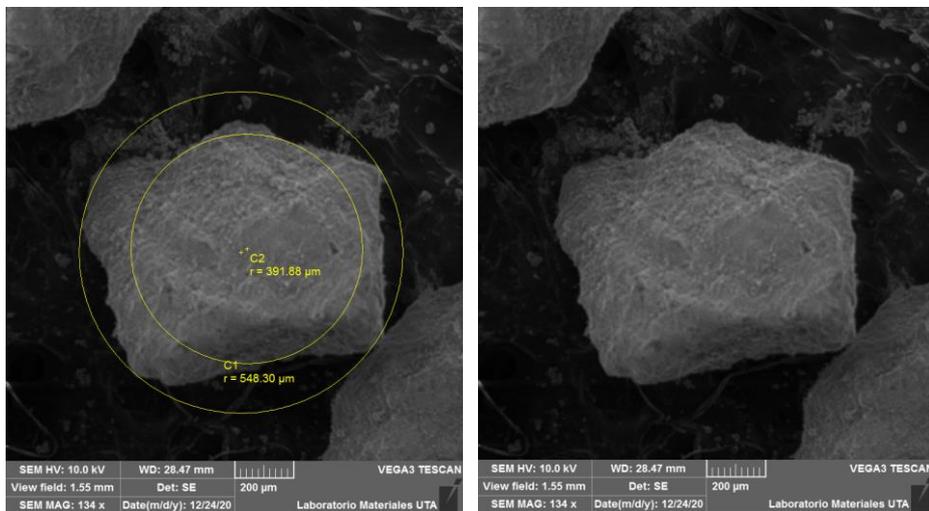
**Figura 34. Esfericidad Zeolita Clinoptilolita, muestra 1**



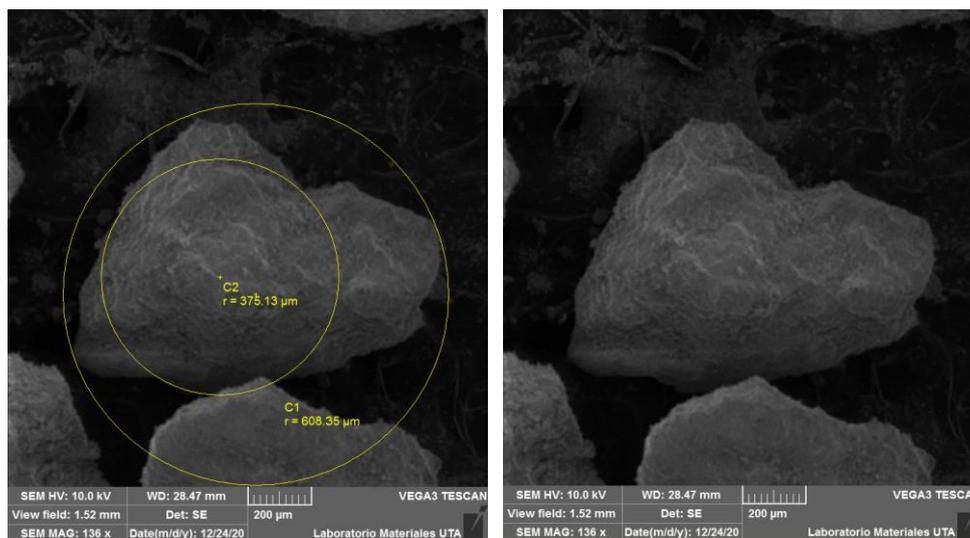
**Figura 35. Esfericidad Zeolita Clinoptilolita, muestra 2**



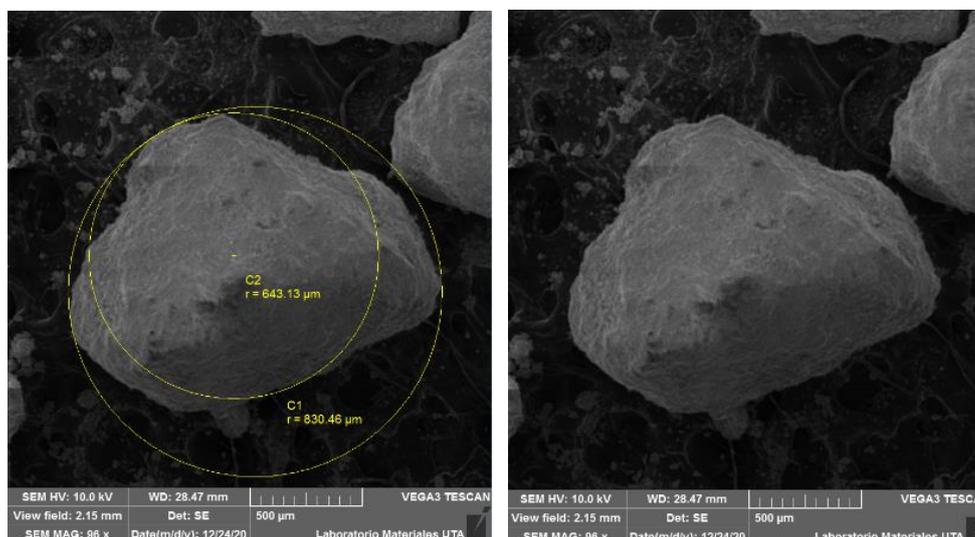
**Figura 36. Esfericidad Zeolita Clinoptilolita, muestra 3**



**Figura 37. Esfericidad Zeolita Clinoptilolita, muestra 4**



**Figura 38. Esfericidad Zeolita Clinoptilolita, muestra 5**



**Tabla 27. Esfericidad Promedio Zeolita Clinoptilolita**

| MUESTRA | DIÁMETRO INTERIOR – C2 (μm) | DIÁMETRO EXTERIOR – C1 (μm) | ESFERICIDAD | ESFERICIDAD PROMEDIO |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|-------------|----------------------|
| 1       | 395.26                      | 533.35                      | 0.86        | 0.85                 |
| 2       | 504.99                      | 659.31                      | 0.88        |                      |
| 3       | 391.88                      | 548.30                      | 0.85        |                      |
| 4       | 375.13                      | 608.35                      | 0.79        |                      |
| 5       | 643.13                      | 830.46                      | 0.88        |                      |

**Elaborado por: Ana María Amaya Díaz**

**Tabla 28. Criterios y valores de Esfericidad**

| <b>REDONDEZ</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>   | <b>VALOR</b> | <b>PROMEDIO</b> |
|-----------------|--|--------------|-----------------|
| Muy Angular     | Superficies fracturadas y múltiples bordes afilados.                       | 0.12 a 0.17  | 0.14            |
| Angular         | Bordes afilados y formas prismáticas                                       | 0.17 a 0.25  | 0.21            |
| Sub Angular     | Esquinas y bordes ligeramente redondeados.                                 | 0.25 a 0.35  | 0.30            |
| Sub Redondeado  | Esquinas y bordes bien redondeados.  | 0.35 a 0.49  | 0.41            |
| Redondeado      | Partículas redondeadas con formas irregulares y no se distinguen esquinas. | 0.49 a 0.70  | 0.59            |
| Muy Redondeado  | Partículas esféricas o elípticas casi lisas.                               | 0.70 a 1.00  | 0.84            |

**Fuente:** [50]

Al obtener una esfericidad de 0.85 de la Zeolita Clinoptilolita, se observa en la *Tabla 28* que la sustancia reactiva se clasifica como muy redondeado, siendo partícula esférica o elíptica casi lisa.

En México, al obtener resultados de esfericidad de la Zeolita Clinoptilolita, Jiménez expone que existe una morfología de forma esférica [48]. En el cual según la *Tabla 28*, pertenece a un valor entre 0.70 a 1.00.

## ZEOLITA MORDENITA

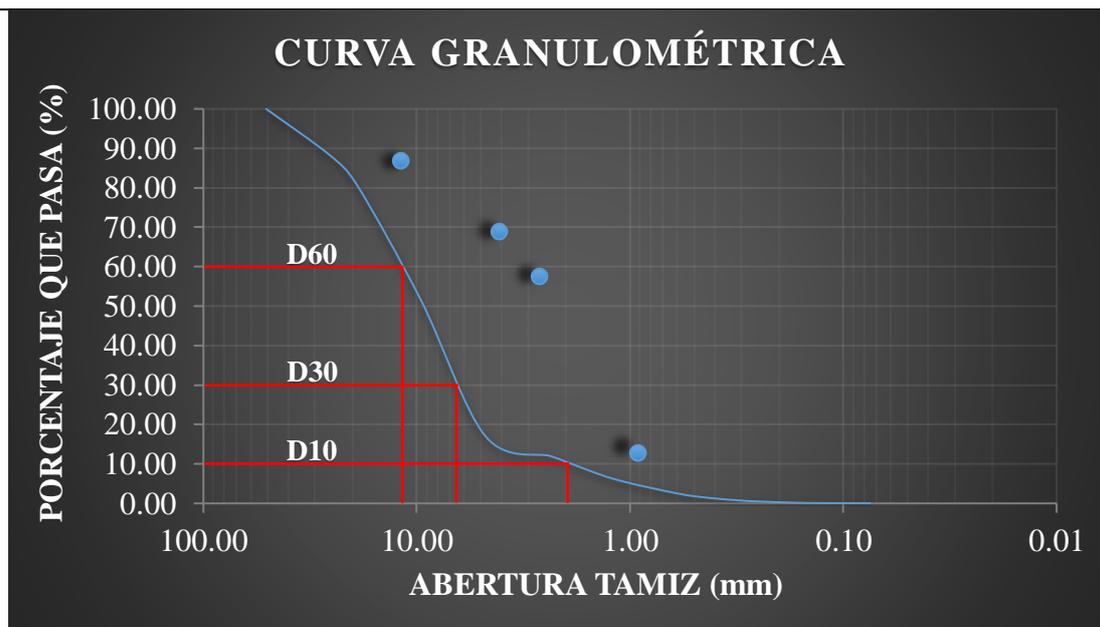


### ENSAYO: GRANULOMETRÍA

**Tabla 29. Granulometría Zeolita Mordenita**

| TAMIZ #              | mm    | PESO<br>RETENIDO<br>(gr) | PESO<br>RET/ACUM.<br>(gr) | %<br>RETENIDO | % QUE<br>PASA |
|----------------------|-------|--------------------------|---------------------------|---------------|---------------|
| 2"                   | 50.80 | 0.00                     | 0.00                      | 0.00          | 100.00        |
| 1"                   | 25.40 | 695.30                   | 695.30                    | 11.85         | 88.15         |
| 3/4"                 | 19.05 | 436.70                   | 1132.00                   | 19.29         | 80.71         |
| 3/8"                 | 9.53  | 1720.70                  | 2852.70                   | 48.60         | 51.40         |
| #4                   | 4.76  | 2017.80                  | 4870.50                   | 82.98         | 17.02         |
| <b>PASA #4</b>       |       | 846.60                   | 1000.00                   | 17.04         |               |
| #8                   | 2.36  | 295.30                   | 295.30                    | 5.03          | 12.01         |
| #10                  | 2.00  | 83.90                    | 379.20                    | 6.46          | 10.58         |
| #16                  | 1.18  | 261.10                   | 640.30                    | 10.91         | 6.13          |
| #30                  | 0.60  | 211.40                   | 851.70                    | 14.51         | 2.53          |
| #40                  | 0.43  | 65.00                    | 916.70                    | 15.62         | 1.42          |
| #50                  | 0.30  | 41.60                    | 958.30                    | 16.33         | 0.71          |
| #60                  | 0.25  | 12.90                    | 971.20                    | 16.55         | 0.49          |
| #100                 | 0.15  | 22.10                    | 993.30                    | 16.92         | 0.11          |
| #200                 | 0.075 | 4.50                     | 997.80                    | 17.00         | 0.04          |
| <b>PASA<br/>#200</b> |       | 1.40                     | 999.20                    | 17.02         |               |
| <b>TOTAL</b>         |       | 5869.70                  | 5869.70                   |               |               |

**Elaborado por: Ana María Amaya Díaz**



**Tabla 30. Características y propiedades de la Zeolita Mordenita**

| TAMAÑO NOMINAL MÁXIMO (mm) | DIÁMETRO EFECTIVO (mm) | DIÁMETRO EQUIPARABLE (mm) | DIÁMETRO DIMENSIONAL (mm) | COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD ( <i>Cu</i> ) | COEFICIENTE DE CURVATURA ( <i>Cc</i> ) |
|----------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|--|--|
| 0.43<br>Tamiz #40          | 0.72                   | 6.80                      | 0.98                      | 1.36                                     | 2.10                                   |

**Elaborado por:** Ana María Amaya Díaz

En Cuba, se realizó un estudio en el cual se menciona que al utilizar una granulometría de partículas finas se obtiene un gran alcance en la adsorción de compuestos y eliminación de agua contaminada, en el cual se ha utilizado material entre el tamiz #16, #30, #40, #50, #60. [51]

## ENSAYO: PERMEABILIDAD

**Tabla 31. Coeficiente de Permeabilidad de la Zeolita Mordenita**

| COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD                      |                       |
|---|-----------------------|
| VOLUMEN MEDIO (cm <sup>3</sup> )                  | 25.00                 |
| LONGITUD DE LA MUESTRA (cm)                       | 6.90                  |
| ÁREA TRANSVERSAL DE LA MUESTRA (cm <sup>2</sup> ) | 32.17                 |
| DIÁMETRO INTERIOR DEL PERMEÁMETRO (cm)            | 6.40                  |
| TIEMPO DE LA PRUEBA (seg)                         | 7.63                  |
| ALTURA DE CARGA HIDRÁULICA (cm)                   | 68.50                 |
| COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (cm/seg)             | $1.03 \times 10^{-2}$ |

Elaborado por: Ana María Amaya Díaz

**Tabla 32. Permeabilidad Relativa Zeolita Mordenita**

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| <b>MUY PERMEABLES GRUESA</b>  | Mayor de $10^{-1}$ Grava                 |
| <b>PERMEABILIDAD MEDIA</b>    | $10^{-1} - 10^{-3}$ arenas, arenas finas |
| <b>BAJA PERMEABILIDAD</b>     | $10^{-3} - 10^{-5}$ arena limosa, sucia  |
| <b>MUY BAJA PERMEABILIDAD</b> | $10^{-5} - 10^{-7}$ limos                |
| <b>IMPERMEABLE</b>            | $10^{-7} - 10^{-9}$ arcillas             |

Al obtener un resultado de  $1.03 \times 10^{-2}$  de permeabilidad, se observa que existe una permeabilidad media, en el cual la sustancia reactiva analizada está catalogada como arena, arena fina.

Rigñack-Delgado expone el comportamiento de permeabilidad de la Zeolita Mordenita, en el cual se determina una permeabilidad media de entre  $1.53 \times 10^{-2}$  y  $1.97 \times 10^{-3}$ . [51]

**ENSAYO: COMPACIDAD**

**Tabla 33. Gravedad Específica Zeolita Mordenita**

| <b>GRAVEDAD ESPECÍFICA</b>                   |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|
| <b>DETALLE</b>                               | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> |
| <b>MASA DEL PICNÓMETRO + AGUA (gr)</b>       | 663.70   | 664.80   | 662.96   |
| <b>MASA MUESTRA DE SUELO (gr)</b>            | 58.80    | 58.20    | 57.80    |
| <b>MASA DEL PICNÓMETRO + AGUA+SUELO (gr)</b> | 722.50   | 723.00   | 720.76   |
| <b>MASA RECIPIENTE (gr)</b>                  | 187.30   | 187.30   | 187.30   |
| <b>MASA RECIPIENTE +MUESTRA SECA (gr)</b>    | 300.00   | 302.10   | 298.90   |
| <b>MASA MUESTRA SECA (gr)</b>                | 112.70   | 114.80   | 111.60   |
| <b>GRAVEDAD ESPECÍFICA</b>                   | 2.09     | 2.03     | 2.07     |
|  | 2.07     |          |          |

**Elaborado por:** Ana María Amaya Díaz

Macías, al realizar un análisis de la gravedad específica de la Zeolita Mordenita, en el cual obtuvo un valor de 2.24. [52]

**Tabla 34. Peso Unitario y Coeficiente de Compacidad de la Zeolita Mordenita**

| <b>SUSTANCIA REACTIVA (gr)</b>             | <b>SUSTANCIA REACTIVA + RECIPIENTE (gr)</b> | <b>PESO UNITARIO (gr/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>PESO UNITARIO PROMEDIO (gr/cm<sup>3</sup>)</b> |
|--|---|--|---|
| 842.50                                     | 2605.30                                     | 2.09                                     | 1.23  |
| 844.08                                     | 2606.88                                     | 1.02                                     |   |
| 843.11                                     | 2605.91                                     | 1.02                                     |   |
| 842.96                                     | 2605.76                                     | 1.02                                     |   |
| 843.02                                     | 2605.82                                     | 1.02                                     |   |
| <b>PESO RECIPIENTE (gr)</b>                |   | 1762.80                                  |   |
| <b>VOLUMEN RECIPIENTE (cm<sup>3</sup>)</b> |   | 824.35                                   |   |
| <b>COEFICIENTE DE COMPACIDAD (%)</b>       |   | 33.33                                    |   |

**Elaborado por:** Ana María Amaya Díaz

La compacidad obtenida es de 33.33% por lo tanto, la Zeolita Mordenita se clasifica como un suelo de compacidad suelta.

**Tabla 35. Compacidad Relativa de la Zeolita Mordenita**

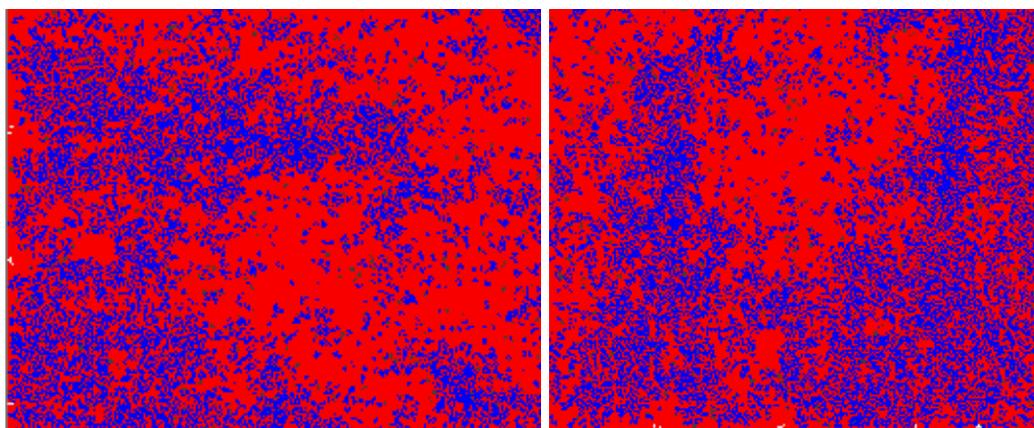
| <b>COMPACIDAD</b> | <b>COMPACIDAD RELATIVA %</b> |
|-------------------|------------------------------|
| Muy suelta        | 0-15                         |
| Suelta            | 15-35                        |
| Media             | 35-65                        |
| Densa             | 65-85                        |
| Muy Densa         | 85-100                       |

**Fuente:**[49]

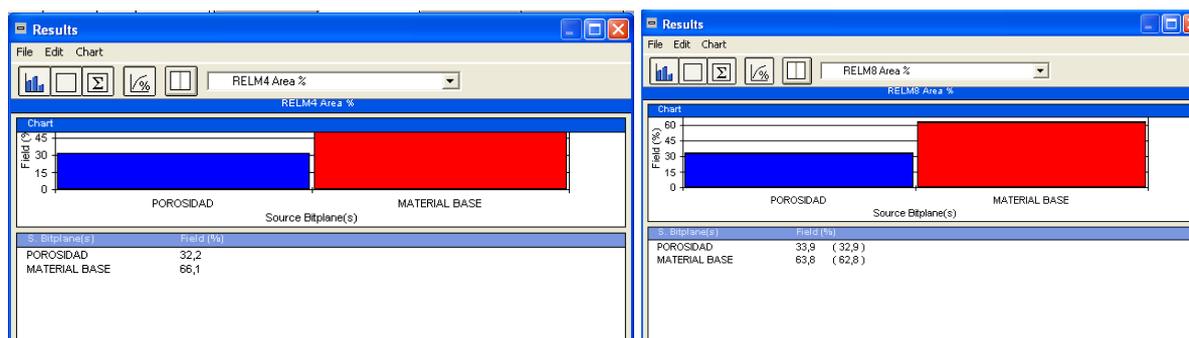
En la ciudad de Cuba, expone que se utiliza una granulometría de partículas finas favoreciendo la adsorción de compuestos y eliminación del agua contaminada, en el cual adquiere una compacidad Media. [51]

## ENSAYO: POROSIDAD

**Figura 39. Fotografía Clemex Vision de la Zeolita Mordenita**



**Figura 40. Tabla Clemex Vision de la Zeolita Mordenita**

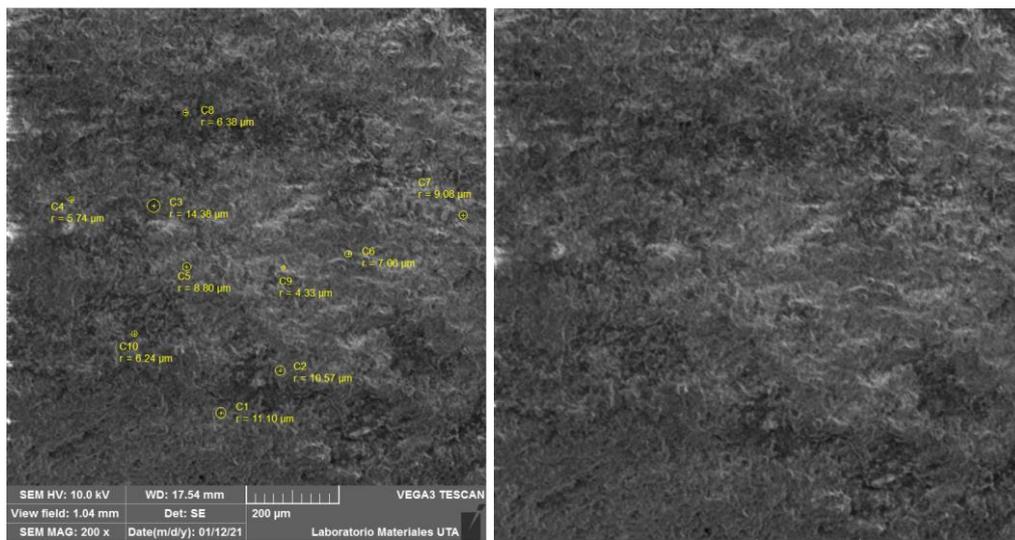


Al haber utilizado las imágenes del Microscopio de Barrido e introducirlas en el software *Clemex Vision*, se observa que la Zeolita Mordenita arroja un valor del 33.05% de porosidad.

Jiménez expone que, al haber realizado estudios de porosidad de la Zeolita Mordenita, obtiene un valor del 29.00%. [53]

A continuación, se ha realizado un análisis más profundo y detallado para la obtención del diámetro promedio de la sustancia reactiva.

**Figura 41. Fotografía diámetro de la Zeolita Mordenita**



**Tabla 36. Diámetro promedio de poros de la Zeolita Mordenita**

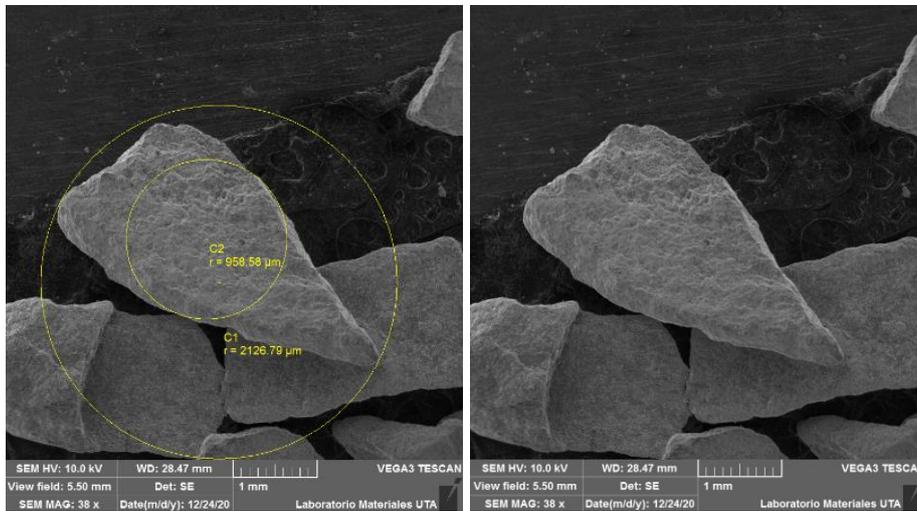
| <b>CIRCUNFERENCIA</b> | <b>RADIO DEL PORO (μm)</b> | <b>DIÁMETRO DEL PORO (μm)</b> | <b>DIÁMETRO PROMEDIO DE POROS (μm)</b> |
|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|--|
| <b>C1</b>             | 11.10                      | 22.20                         | 16.74                                  |
| <b>C2</b>             | 10.57                      | 21.14                         |  |
| <b>C3</b>             | 14.38                      | 28.76                         |  |
| <b>C4</b>             | 5.74                       | 11.48                         |  |
| <b>C5</b>             | 8.80                       | 17.60                         |  |
| <b>C6</b>             | 7.06                       | 14.12                         |  |
| <b>C7</b>             | 9.08                       | 18.16                         |  |
| <b>C8</b>             | 6.38                       | 12.76                         |  |
| <b>C9</b>             | 4.33                       | 8.66                          |  |
| <b>C10</b>            | 6.24                       | 12.48                         |  |

**Elaborado por:** Ana María Amaya Díaz

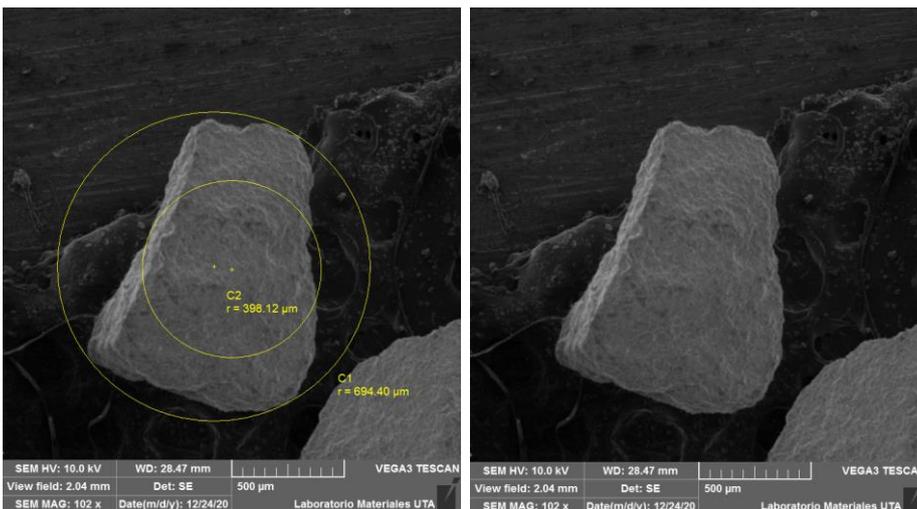
Por lo tanto, si clasificamos el rango de poros que se encuentran en la sustancia reactiva según la *Tabla 3.*, se obtienen microporos.

## ENSAYO: ESFERICIDAD

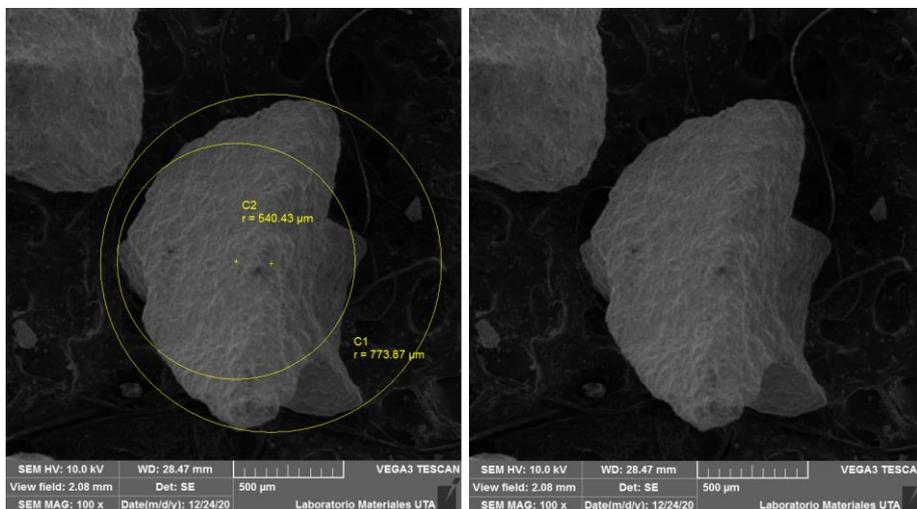
**Figura 42. Esfericidad Zeolita Mordenita, muestra 1**



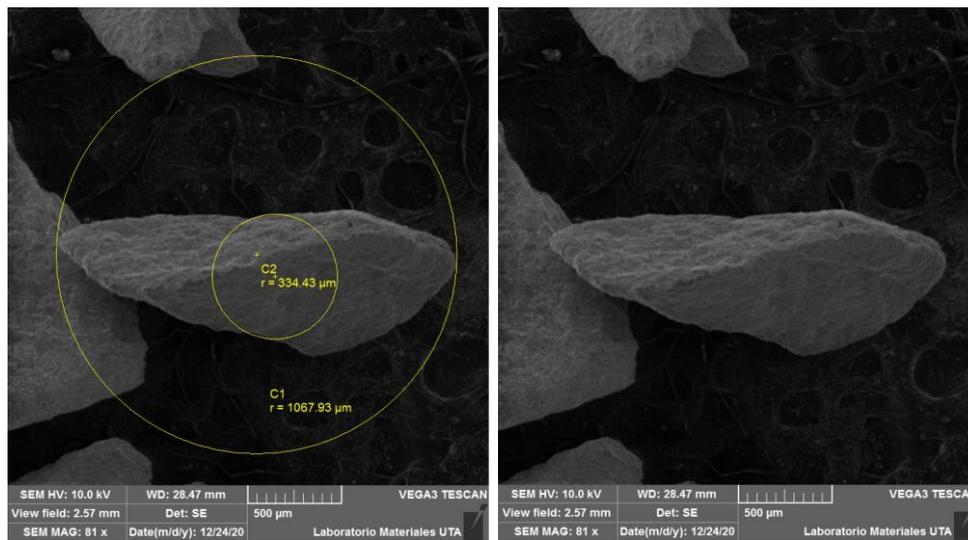
**Figura 43. Esfericidad Zeolita Mordenita, muestra 2**



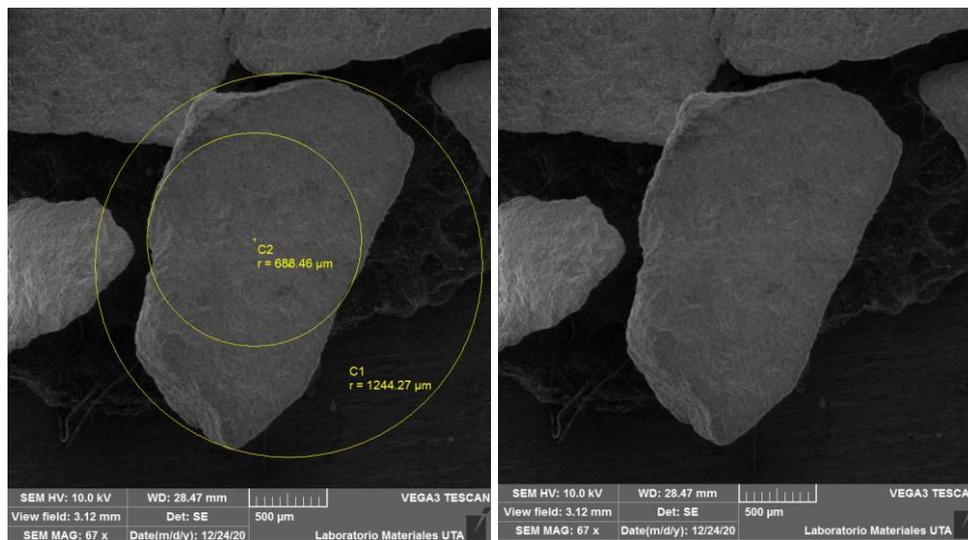
**Figura 44. Esfericidad Zeolita Mordenita, muestra 3**



**Figura 45. Esfericidad Zeolita Mordenita, muestra 4**



**Figura 46. Esfericidad Zeolita Mordenita, muestra 5**



**Tabla 37. Esfericidad Promedio de la Zeolita Mordenita**

| MUESTRA | DIÁMETRO INTERIOR – C2 (μm) | DIÁMETRO EXTERIOR – C1 (μm) | ESFERICIDAD | ESFERICIDAD PROMEDIO |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|-------------|----------------------|
| 1       | 958.58                      | 2126.79                     | 0.67        | 0.71                 |
| 2       | 398.12                      | 694.40                      | 0.76        |                      |
| 3       | 540.43                      | 773.87                      | 0.84        |                      |
| 4       | 334.43                      | 1067.93                     | 0.56        |                      |
| 5       | 688.46                      | 1244.27                     | 0.74        |                      |

**Elaborado por: Ana María Amaya Díaz**

**Tabla 38. Criterios y valores de Esfericidad**

| <b>REDONDEZ</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>   | <b>VALOR</b> | <b>PROMEDIO</b> |
|-----------------|--|--------------|-----------------|
| Muy Angular     | Superficies fracturadas y múltiples bordes afilados.                       | 0.12 a 0.17  | 0.14            |
| Angular         | Bordes afilados y formas prismáticas                                       | 0.17 a 0.25  | 0.21            |
| Sub Angular     | Esquinas y bordes ligeramente redondeados.                                 | 0.25 a 0.35  | 0.30            |
| Sub Redondeado  | Esquinas y bordes bien redondeados.  | 0.35 a 0.49  | 0.41            |
| Redondeado      | Partículas redondeadas con formas irregulares y no se distinguen esquinas. | 0.49 a 0.70  | 0.59            |
| Muy Redondeado  | Partículas esféricas o elípticas casi lisas.                               | 0.70 a 1.00  | 0.84            |

**Fuente:** [50]

Al obtener una esfericidad de 0.71 de la Zeolita Mordenita, se observa en la *Tabla 38* que la sustancia reactiva se clasifica como muy redondeado, siendo partícula esférica o elíptica casi lisa.

En México, Jiménez al obtener resultados de esfericidad de la Zeolita Mordenita, expone que existe una morfología de forma elíptica de formas irregulares [48]. En el cual según la *Tabla 38*, pertenece a un valor entre 0.70 a 1.00.

### 3.2 Verificación de Hipótesis

Al inicio del presente trabajo experimental se planteó como hipótesis alterna:

*“Las características físicas de sustancias reactivas: Piroclasto Volcánico, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita de origen Ecuatoriano se asemejan a los parámetros de lechos filtrantes utilizados para el tratamiento de agua.”*

En el cual, una vez realizado el plan de procesamiento y análisis de resultados, se demostró que las sustancias reactivas Ecuatorianas tienen las siguientes características físicas:

**Tabla 39. Resultados Sustancias Reactivas**

| <b>SUSTANCIAS REACTIVAS</b>       |                             |                               |                          |
|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| <b>ENSAYO</b>                     | <b>PIROCLASTO VOLCÁNICO</b> | <b>ZEOLITA CLINOPTILOLITA</b> | <b>ZEOLITA MORDENITA</b> |
| <b>TAMAÑO NOMINAL MÁXIMO (mm)</b> | 0.43                        | 0.43                          | 0.43                     |
| <b>COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD</b> | 10.00                       | 1.36                          | 1.36                     |
| <b>COEFICIENTE DE CURVATURA</b>   | 4.31                        | 0.88                          | 2.10                     |
| <b>PERMEABILIDAD (cm/seg)</b>     | $1.88 \times 10^{-2}$       | $1.40 \times 10^{-2}$         | $1.03 \times 10^{-2}$    |
| <b>COMPACIDAD (%)</b>             | 76.92                       | 66.67                         | 33.33                    |
| <b>POROSIDAD (%)</b>              | 35.80                       | 35.30                         | 33.05                    |
| <b>ESFERICIDAD</b>                | 0.82                        | 0.85                          | 0.71                     |

**Elaborado por:** Ana María Amaya Díaz

Así mismo, en Cuenca se realizó varios estudios de medición de permeabilidad hidráulica, en el cual Nieto hace referencia a la implementación de varios materiales, presentando filtros biológicos con geotextil, obteniendo un costo elevado de implementación. [54]

Por otro lado, Colombia presenta un sistema de medición de permeabilidad hidráulica de cabeza constante con la implementación de geotextil, Rodríguez menciona que no se pudo

obtener valores de permeabilidad confiables, ya que el diseño e implementación de materiales no fue el adecuado ya que se estuvo alterada. [55]

Cabe mencionar que, en los estudios anteriormente citados se logró observar diseños con un alto costo de implementación y fabricación, en el cual la implementación de geotextil no obtuvo el costo y los resultados óptimos esperados.

Finalmente, se puede verificar que se implementó el diseño de un sistema de medición de permeabilidad hidráulica para el análisis de sustancias reactivas: Piroclastos Volcánicos, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita, logrando un diseño de implementación rápida, teniendo en cuenta un costo accesible.

## 4. CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

Finalmente, como resultado de la investigación experimental se ha logrado complementar y analizar la información bibliográfica del origen y las principales características fisicoquímicas de las sustancias reactivas: Piroclasto Volcánico, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita. Tomando en cuenta que la eficacia de un biofiltro se ve incrementada por sus características físicas para la obtención de la mayor capacidad de retención de agua contaminada.

- El Piroclasto Volcánico, presenta un buen comportamiento como material filtrante en la depuración de aguas residuales. Igualmente, se menciona que este tipo de sustancia se lo puede encontrar fácilmente y de bajo costo. Debido a su gran característica como material poroso la retención de contaminantes en los efluentes es mayor.
- Las Zeolitas, obtienen niveles de purificación de agua bastante notables y logra la remoción de metales pesados como níquel, plomo, cobre, arsénico, sulfatos, fosfatos, y cloruros. La Zeolita Clinoptilolita posee un mejor rendimiento para la remoción de amonio en aguas servidas en comparación a la Zeolita Modernita.
- Al hablar de la implementación y diseño del permeámetro de carga constante se basó en la normativa ASTM D5084, utilizando el software Revit. El diseño que se realizó fortaleció y complementó su funcionalidad y ejecución.
- En cuanto al diseño y esquema del permeámetro de carga constante, lo fundamental fue el costo de implementación, en el cual se implementó materiales de fácil accesibilidad, tomando en cuenta que al hablar de la sustancia reactiva y la relación precio – calidad, el Piroclasto Volcánico fue el óptimo ya que se lo puede encontrar en nuestro país (Baños de Agua Santa, Ecuador.) y su comportamiento de retención de efluentes debido a su alta porosidad.
- En cuanto a la caracterización del Piroclasto Volcánico, acorde al Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS), se clasifica la sustancia reactiva como suelo de grano grueso (*Tabla 2*), obteniendo un 80.56% de grava retenido en el tamiz N° 4 y 19.54% de arena que pasa el tamiz N° 4.

- En cuanto a la caracterización de la Zeolita Clinoptilolita, acorde al Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS), se clasifica la sustancia reactiva como suelo de grano fino (*Tabla 2*), obteniendo en su mayoría el paso de partículas en el tamiz N°16 y N°200.
- En cuanto a la caracterización de la Zeolita Mordenita, acorde al Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS), se clasifica la sustancia reactiva como suelo de grano grueso (*Tabla 2*), obteniendo un 82.98% de grava retenido en el tamiz N° 4 y 17.04% de arena que pasa el tamiz N° 4.
- Al mencionar la granulometría del Piroclasto Volcánico, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita; conforme a las normas ASTM D421-58 y AASHTO T87-70 se obtuvo un tamaño nominal máximo de 0.43 mm.
- De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS), se determinó el coeficiente de uniformidad y curvatura del Piroclasto Volcánico, obteniendo 10.00 y 4.31 respectivamente; es decir, su coeficiente de uniformidad es mayor a 3 clasificándose como un material heterogéneo y el coeficiente de curvatura se encuentra fuera del rango 1 a 3 calificándose como material mal graduado.
- De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS), se determinó el coeficiente de uniformidad y curvatura de la Zeolita Clinoptilolita, obteniendo 1.36 y 0.88 respectivamente; es decir, su coeficiente de uniformidad es menor a 3 clasificándose como un material homogéneo y el coeficiente de curvatura se encuentra fuera del rango 1 a 3 calificándose como material mal graduado.
- De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS), se determinó el coeficiente de uniformidad y curvatura de la Zeolita Mordenita, obteniendo 1.36 y 2.10 respectivamente; es decir, su coeficiente de uniformidad es menor a 3 clasificándose como un material homogéneo y el coeficiente de curvatura se encuentra dentro del rango 1 a 3 calificándose como material bien graduado.
- Al haber determinado la permeabilidad de las sustancias reactivas: Piroclasto Volcánico, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita, se obtuvo un valor de  $1.88 \times 10^{-2}$ ,  $1.40 \times 10^{-2}$ ,  $1.03 \times 10^{-2}$  respectivamente; en el cual se clasifica como un material de permeabilidad media de arena y arenas finas *Tabla 36*. Cabe recalcar que la sustancia reactiva utilizada fue del tamiz #16, #30, #40, #50, #60.
- Se determinó el coeficiente de compacidad del Piroclasto Volcánico y Zeolita Clinoptilolita del 76.92% y 66.67% respectivamente; es decir, se clasifica como una

sustancia reactiva de compacidad densa. Sin embargo, la Zeolita Mordenita presenta el 33.33% calificándose una compacidad suelta *Tabla 15-24-33*.

- Al mencionar la porosidad que posee las sustancias reactivas: Piroclasto Volcánico, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita, se determinó 35.80%, 35.30% y 33.05% respectivamente, además evidenció que todas las sustancias reactivas obtienen un tamaño de poros clasificados como microporos *Tabla 3*.
- Con respecto a la esfericidad del Piroclasto Volcánico, Zeolita Clinoptilolita, Zeolita Mordenita se determinó un valor de 0.82, 0.85 y 0.71; es decir, las sustancias reactivas se clasifican como muy redondeado, siendo partículas esféricas o elípticas casi lisas *Tabla 18-28-38*.

## 4.2 Recomendaciones

- Se recomienda que, los materiales que serán utilizados para el análisis, referencias bibliográficas y características cumplan con los parámetros de medios filtrantes estudiados anteriormente.
- Tener en cuenta que la selección del material sea la adecuada y óptima para garantizar análisis de calidad, precio accesible y calidad en el origen de cada sustancia reactiva.
- Realizar pruebas de remoción y absorción de contaminantes con aguas residuales por medio de pruebas en escala real o plantas piloto.
- Como recomendación, al implementar un sistema de medición de permeabilidad hidráulica y porosidad, tomar en cuenta el material con mayor porosidad y granulometría óptima para la descontaminación del agua, en este caso del Piroclasto Volcánico.

## 5. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] A. Galindo, E. Toncel, and N. Rincón, “Evaluación de un filtro biológico como unidad de post-tratamiento de aguas residuales utilizando conchas marinas como material de soporte,” *Rev. ION*, vol. 29, no. 2, pp. 37–48, 2017, doi: 10.18273/revion.v29n2-2016003.
- [2] C. Sanhueza, P. Valenzuela, J. Palma, O. Araneda, and K. Calderón, “Evaluación del comportamiento geotécnico de suelos volcánicos chilenos para su uso como material de filtro en la depuración de aguas residuales domésticas,” *Rev. la Constr.*, vol. 10, no. 2, pp. 66–81, 2011, doi: 10.4067/s0718-915x2011000200007.
- [3] S. González Martínez, T. Millán Salazar, and Ó. González Barceló, “Filtración Aerada De Aguas Residuales Municipales Utilizando Un Medio Filtrante De Bajo Costo,” *Rev. AIDIS Ing. y Ciencias Ambient. Investig. Desarro. y práctica*, vol. 3, no. 1, pp. 132–144, 2011.
- [4] N. K. Srivastava and C. B. Majumder, “Novel biofiltration methods for the treatment of heavy metals from industrial wastewater,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 151, no. 1, pp. 1–8, 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.101.
- [5] H. Cabrera, M. Garcés, and P. Paredes, “Proyecto de desarrollo de capacidades para el uso seguro de aguas servidas en agricultura,” *Minist. Agric. Ganad. y Pesca Minist. Salud Pública EMAPAG-EP*, pp. 1–12, 2012.
- [6] A. Castillo, “Diseño De Un Tratamiento De Aguas Residuales De Lubricado Mediante Bio-Adsorción Y Coagulación-Floculación,” *Udla*, pp. 81–87, 2015, doi: 10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- [7] D. E. R. Naturales, “Universidad tecnológica equinoccial,” 2017.
- [8] C. Model and C. Region, “Modelo de costos para el tratamiento de las aguas residuales en la región.,” no. 37, pp. 591–596, 2007.
- [9] J. Fernando and C. Miño, “UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil Análisis hidrosanitario de trampa de grasa con aireación para disminuir los compuestos tensoactivos y aceites lubr,” 2015, [Online]. Available: <http://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/2198/1/T-UIDE-1247.pdf>.

- [10] F. Morales Fiallos, R. Sánchez Proaño, and R. Acosta Lozada, “Tratamiento de efluentes de lubricadoras y lavadoras de autos mediante un sistema de lodos activados de lechos suspendido a escala de laboratorio,” *Cienc. Digit.*, vol. 3, no. 1, pp. 236–256, 2019, doi: 10.33262/cienciadigital.v3i1.278.
- [11] R. M. Ribeiro, R. Bergamasco, M. L. Gimenes, and C. M. O. Müller, “Preparación de membranas para producción de agua potable,” *Inf. tecnológica*, vol. 18, no. 1, pp. 15–22, 2007.
- [12] “Vista de LA ZEOLITA EN LA DESCONTAMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES | Universidad Ciencia y Tecnología.” <https://www.uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/73/74> (accessed Feb. 24, 2021).
- [13] “(No Title).” [http://www.mineraformas.cl/docs/zeolitas\\_medio\\_ambiente.pdf](http://www.mineraformas.cl/docs/zeolitas_medio_ambiente.pdf) (accessed Feb. 24, 2021).
- [14] “UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA.” Accessed: Feb. 24, 2021. [Online]. Available: [www.fig.ug.edu.ec](http://www.fig.ug.edu.ec).
- [15] J. C. Torres Jaya, “Análisis del piroclasto volcánico como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la Lavadora y Lubricadora de Autos ‘Ambato’ ubicada en la ciudad de Ambato provincia de Tungurahua,” Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingenier{\'i}a Civil y Mecánica~..., 2018.
- [16] M. LICTO, “Evaluación De Un Proceso De Tratamiento De Aguas Residuales Provenientes De Una Industria Láctea,” p. 123, 2017, doi: 10.1103/PhysRevX.7.041008.
- [17] L. E. Escobar Luna and N. A. Ovando Burga, “Universidad Técnica De Ambato Facultad De Ingeniería Civil Y Mecánica Carrera De Ingeniería Mecánica,” p. 100, 2018, [Online]. Available: <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/29865>.
- [18] G. Critten, John C. Trussell, Rhodes. Hand, David. Howe, Kerry. Tchobanoglous, *MWH Water Treatment Principles and Design*. 2014.
- [19] “Y La Sustancia (Ya Sea Líquida O Gaseosa) En La Cual Se Efectúa Dicho Fenómeno Es El,” pp. 51–68.

- [20] W. P. and K. M. B. V. J. Caiozzo, F. Haddad, S. Lee, M. Baker, “No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における 健康関連指標に関する共分散構造分析Title,” pp. 1–19, 2019.
- [21] R. Sierra, “ADSORCIÓN DE ÁCIDOS CARBOXÍLICOS DE CADENA CORTA SOBRE CARBÓN ACTIVADO: ESTUDIO EN UNA REACCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO: ESTUDIO EN UNA REACCIÓN DE,” 2013.
- [22] J. Simeon, “EN AGREGADO FINO Y GRUESO Y DETERMINACIÓN DE MATERIAL MÁS FINO QUE EL TAMIZ No . 200 ( 75  $\square$  m ) EN AGREGADO MINERAL POR LAVADO,” *Anal. TAMAÑO PARTÍCULAS POR TAMIZADO EN Agreg. FINO Y GRUESO Y Determ. Mater. MÁS FINO QUE EL TAMIZ No. 200 (75  $\square$ m) EN Agreg. Miner. POR LAVADO*, vol. 1, no. 01, p. 15, 1996, [Online]. Available: file:///C:/Users/alum.fial8/Desktop/shi/GRANULOMETRIA.pdf.
- [23] “CAPITULO I EL SUELO COMO MATERIAL DE RETENCION.”
- [24] J. L. González-Barrios, G. González-Cervantes, and E. Chávez-Ramírez, “Porosidad del suelo en tres superficies típicas de la cuenca alla del río Nazas,” *Tecnol. y Ciencias del Agua*, vol. 3, no. 1, pp. 21–32, 2012.
- [25] L. Raúl Horacio López Asesor Científico, J. Andrés Zgrablich Co-Asesor Científico, and D. Ana María Vidales San Luis, “Tesis para optar al Grado de Doctor en Física,” 2004.
- [26] P. B. Tarigan, “済無No Title No Title,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [27] R. Legaz Berbel, “Estudio de la viscosidad y densidad de diferentes aceites para su uso como biocombustible,” pp. 23–28, 2010, [Online]. Available: <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/9403>.
- [28] “Pressure.” <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/pflu.html> (accessed Apr. 20, 2020).
- [29] “PRESIÓN.”
- [30] G. Villota, ““Diseño De Un Filtro Con Piroclastos Gruesos Para La Purificación Del Agua De La Comunidad De Vizcaya (Baños- Tungurahua),”” *Esc. Super. Politécnica*

- Chimborazo*, pp. 1–172, 2009.
- [31] M. A. Montoro, “Presencia De Partículas De Limo Y Arcilla . 1 Intrinsic Permeability of Sandy Soils With High,” vol. 11, no. 1, pp. 163–178, 2011.
- [32] F. H. Patiño, “RESISTIVIDAD HIDRÁULICA: UNA REVISIÓN CRITICA,” 2003.
- [33] Rismiati, *No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析* Title. 2016.
- [34] S. Angelone, M. T. Garibay, and M. Cauhapé C., “Geología y Geotecnia - Permeabilidad de suelos,” *Univ. Nac. Rosario*, p. 39, 2006, [Online]. Available: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Geolog?a+y+Geotecnia#4>.
- [35] I. Juan Carlos Ruge Cárdenas Cristhian Andrés Valencia Betancourt John Freddy Triana Restrepo, “PERMEÁMETRO DE CARGA CONSTANTE PARA SUELOS GRANULARES PROYECTO DE GRADO UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA INGENIERÍA CIVIL.”
- [36] “Medios Filtrantes - Keiken Engineering.” <https://www.keiken-engineering.com/medios-filtrantes/> (accessed Aug. 12, 2020).
- [37] J. Torres, “Análisis del piroclasto volcánico como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la lavadora y lubricadora de autos ‘Ambato’ ubicada en la ciudad de ambato provincia de Tungurahua.,” pp. 1–83, 2017, [Online]. Available: [http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/5665/1/TESIS ENTORNO FAMILIAR INFLUENCIA RENDIMIENTO ESCOLAR1.pdf](http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/5665/1/TESIS_ENTORNO_FAMILIAR_INFLUENCIA_RENDIMIENTO_ESCOLAR1.pdf).
- [38] Muzio Rossana, “Rocas Piroclásticas Vulcanismo,” *Universida la Repub. Uruguay*, no. Rocas piroplasticas, p. 56, 2011, [Online]. Available: [http://cuencas.fcien.edu.uy/cursos/materiales/rocas\\_piroclasticas.pdf](http://cuencas.fcien.edu.uy/cursos/materiales/rocas_piroclasticas.pdf).
- [39] “Zeolitas - Geología - publicaciones.” <https://post.geoxnet.com/zeolitas/> (accessed Aug. 12, 2020).
- [40] S. Wang and Y. Peng, “Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment,” *Chem. Eng. J.*, vol. 156, no. 1, pp. 11–24, 2010.
- [41] ع. ربانی, “No Title بیوشیمی,” p. 93, 1393.

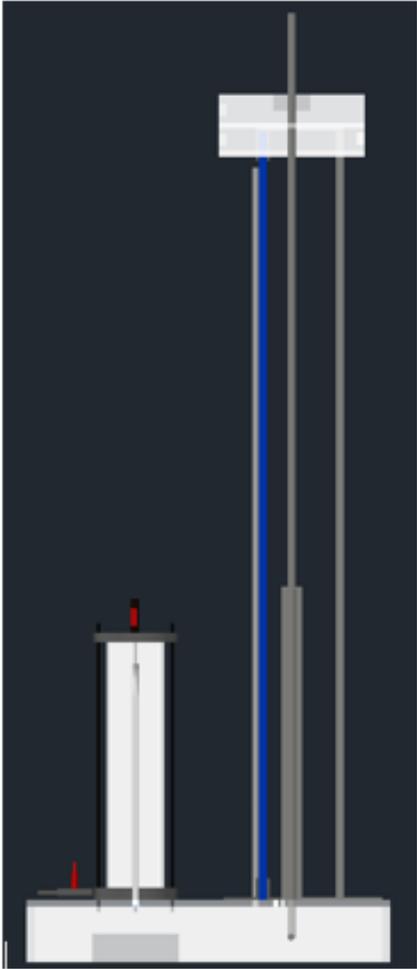
- [42] “(PDF) Zeolitas de México: Diversidad Mineralógica y aplicaciones.” [https://www.researchgate.net/publication/235924910\\_Zeolitas\\_de\\_Mexico\\_Diversidad\\_Mineralogica\\_y\\_aplicaciones](https://www.researchgate.net/publication/235924910_Zeolitas_de_Mexico_Diversidad_Mineralogica_y_aplicaciones) (accessed Oct. 05, 2020).
- [43] T. B. P. Silva, E. Campos, and M. T. Olguin, “Remoción de nitrógeno, cadmio y zinc del agua, utilizando clinoptilolita heulandita,” *Cienc. ergo-sum, Rev. Científica Multidiscip. Prospect.*, vol. 7, no. 3, 2000.
- [44] M. N. R. M. Mhs. F. (World Health, “No Titleتجزئة,” *Curr. Top. Microbiol. Immunol.*, vol. 284, pp. 99–119, 2004, [Online]. Available: <https://lib.unnes.ac.id/17153/1/1201408017.pdf>.
- [45] M. A. Hernández, “Estructura porosa y propiedades estructurales de mordenita y clinoptilolita,” *Superf. y vacío*, vol. 23, pp. 51–56, 2010.
- [46] F. Oswaldo, A. Egúez, J. Carlos, and C. Castillo, “ESCUELA POLITECNICA DEL EJÉRCITO FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ‘IMPLEMENTACIÓN DE METALOGRAFÍA CUANTITATIVA COMPUTARIZADA PARA EL LABORATORIO DE METALURGIA DE LA ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO Y VALORACIÓN DE RESULTADOS CON ENSAYOS METALOGRAFÍCOS REQUERIDOS EN EL SECTOR METALMECÁNICO REGIONAL’ PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO.”
- [47] “Microscopía Electrónica de Barrido.” <http://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html> (accessed Jan. 19, 2021).
- [48] C. Sanhueza, J. Palma, P. Valenzuela, O. Araneda, and K. Calderón, “Evaluación del comportamiento geotécnico de suelos volcánicos chilenos para su uso como material de filtro en la depuración de aguas residuales domésticas,” *Rev. la construcción*, vol. 10, no. 2, pp. 66–81, 2011.
- [49] “(PDF) COMPACIDAD RELATIVA (Cr, %) o DENSIDAD RELATIVA (DR | Max Portocarrero - Academia.edu.” [https://www.academia.edu/8591712/COMPACIDAD\\_RELATIVA\\_Cr\\_o\\_DENSIDAD\\_RELATIVA\\_DR](https://www.academia.edu/8591712/COMPACIDAD_RELATIVA_Cr_o_DENSIDAD_RELATIVA_DR) (accessed Feb. 10, 2021).
- [50] A. Fernández-Lavín, “Static and post cyclic behavior of unsaturated mine tailings

View project Regional sbsidenc in Mexico City: its effects and consequences View project.” Accessed: Feb. 09, 2021. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/329328101>.

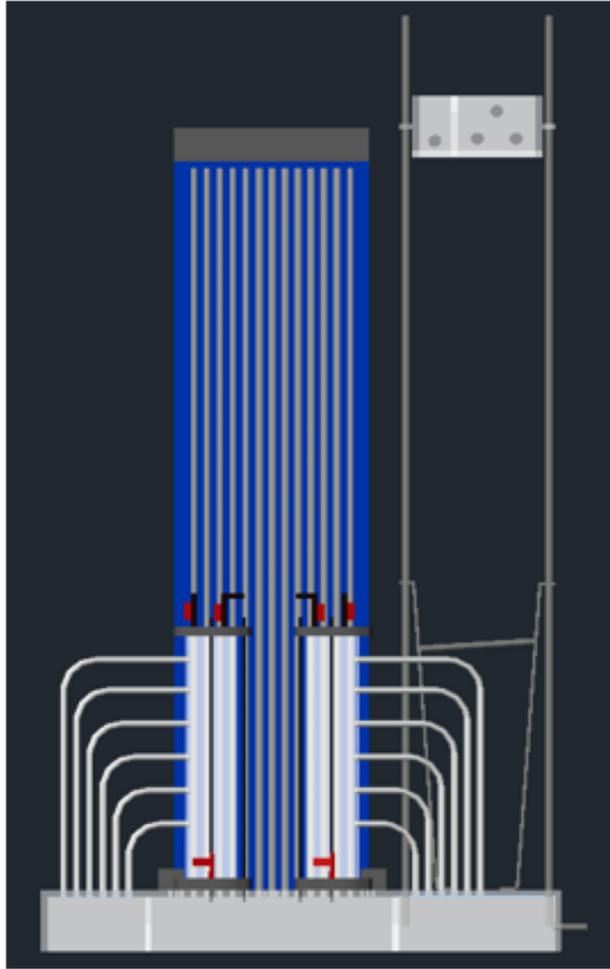
- [51] “Vista de Reducción de metales pesados en el crudo ligero cubano con el uso de zeolita.” <https://tecnologiaquimica.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/5161/4631> (accessed Mar. 15, 2021).
- [52] A. F. Macías, A. G. Spinola, T. M. H. Mendoza, F. L. De González, and F. P. Zelaya, “Efecto de la adición de zeolita (clinoptilolita y mordenita) en un andosol sobre el ambiente químico edáfico y el crecimiento de avena,” *Interciencia*, vol. 32, no. 10, pp. 692–696, 2007.
- [53] Mi. J. Jimenez Cedillo, “Caracterización De Minerales Zeolíticos Mexicanos,” *Mater. Sci. Forum*, pp. 1–77, 2004.
- [54] K. Alexandra Nieto Correa, J. Sebastián Zambrano Jaramillo, and I. Karla Johanna Santacruz Reyes, “UNIVERSIDAD DE CUENCA Facultad de Ingeniería Carrera de Ingeniería Civil.”
- [55] “(No Title).” <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v40n3/2224-6185-rtq-40-03-469.pdf> (accessed Mar. 15, 2021).

6. ANEXOS

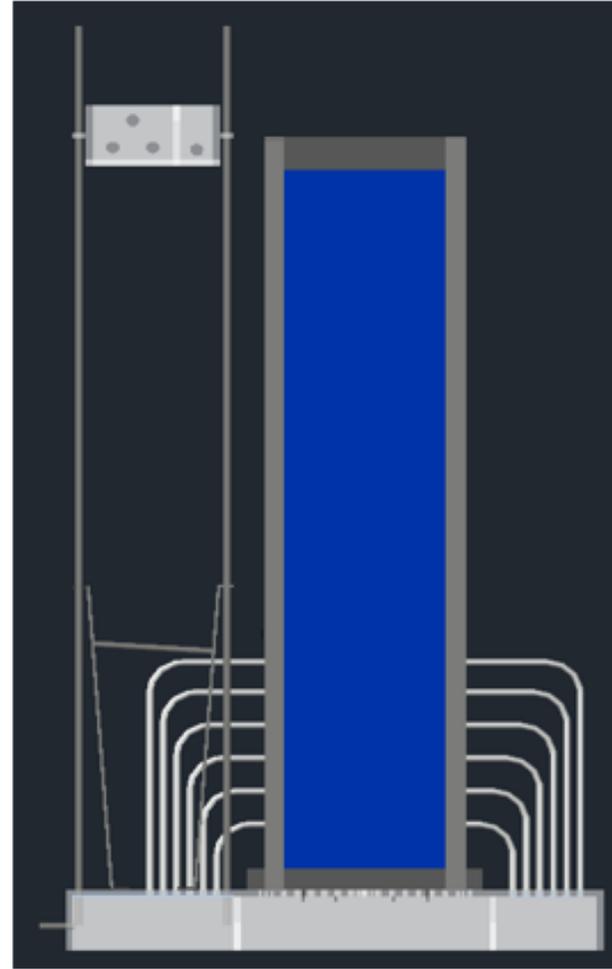
6.1 IMÁGENES 3D PERMEÁMETRO CARGA VARIABLE



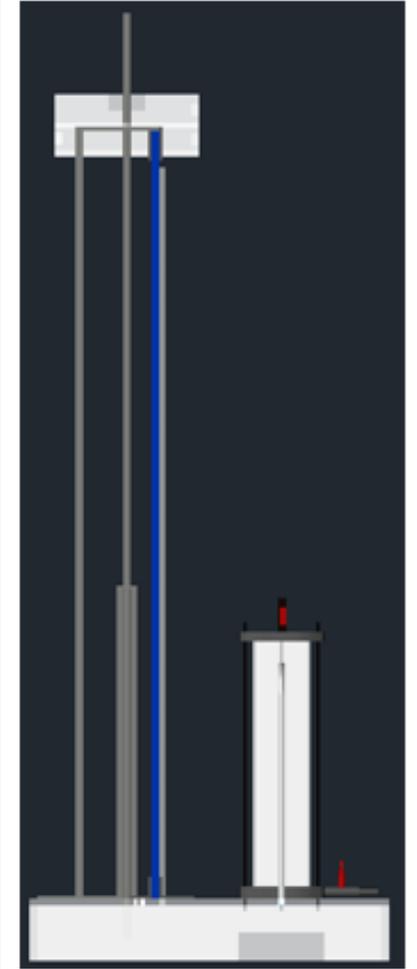
VISTA LATERAL  
DERECHA



VISTA FRONTAL

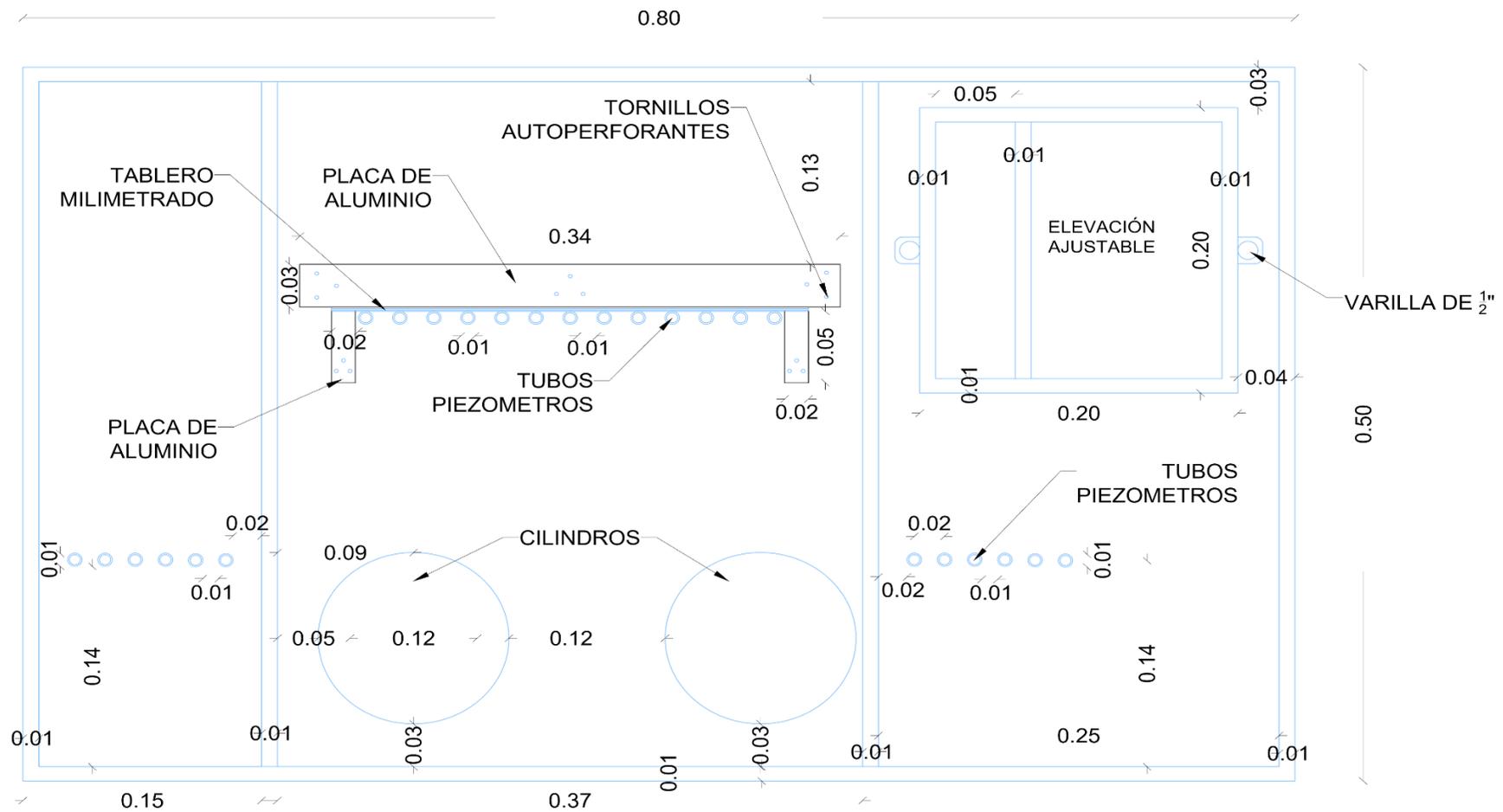


VISTA POSTERIOR

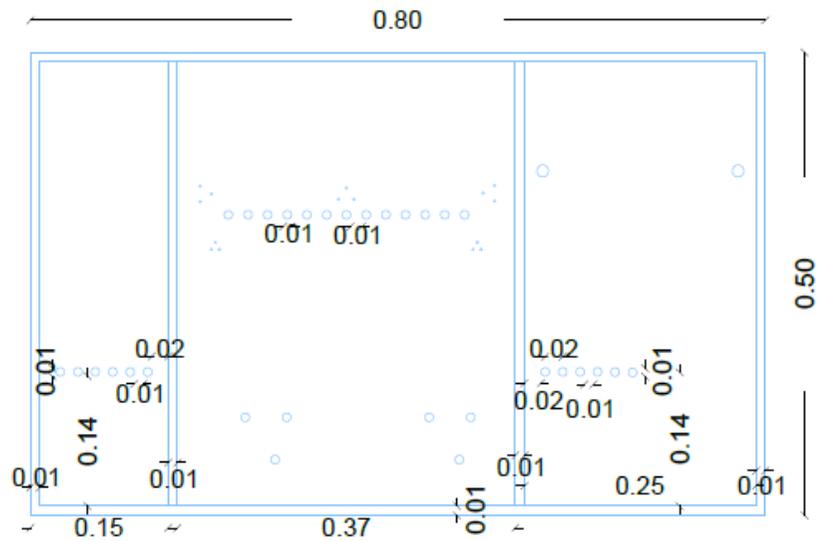


VISTA LATERAL  
IZQUIERDA

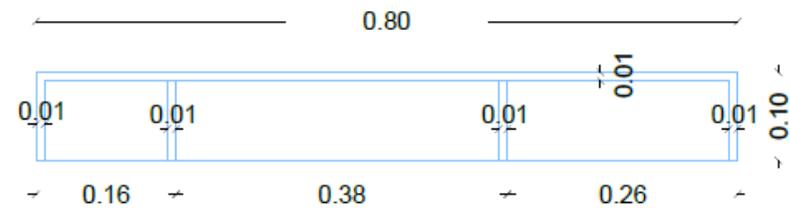
## 6.2 PLANOS PEAMEÁMETRO CARGA CONSTANTE



|  |   |   |   |                               |
|--|---|---|---|-------------------------------|
|  | <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b><br>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA |   |  |                               |
|  | PROYECTO:<br><b>DISEÑO DE PERMEAMETRO</b>                                       | CONTENIDO:<br><b>PLANTA DE PERMEAMETRO<br/>                 COMPONENTES EN BASE</b> |   |                               |
|  | REALIZADO POR:<br><b>DANIEL CABEZAS, EGRESADO</b>                               | REVISADO POR:<br><b>ANA MARIA AMAYA, EGRESADA</b>                                   |   | ESCALA:<br><b>1:250</b>       |
|  | COLOCAR EL NOMBRE INGENIERO CIVIL   |   |   | FECHA:<br><b>OCTUBRE 2020</b> |
|  |   | LAMINA:<br><b>1/5</b>   |   |                               |



VISTA EN PLANTA BASE SOPORTE



VISTA FRONTAL



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

NOMBRE: DISEÑO DE PERMEAMETRO

CORRECCIÓN: VISTA EN PLANTA BASE SOPORTE  
VISTA FRONTAL

ELABORADO POR:  
DANIEL CABEZAR  
EGREBADO

ANALIZADO POR:  
ANA MARIA AMAYA  
EGREBADA

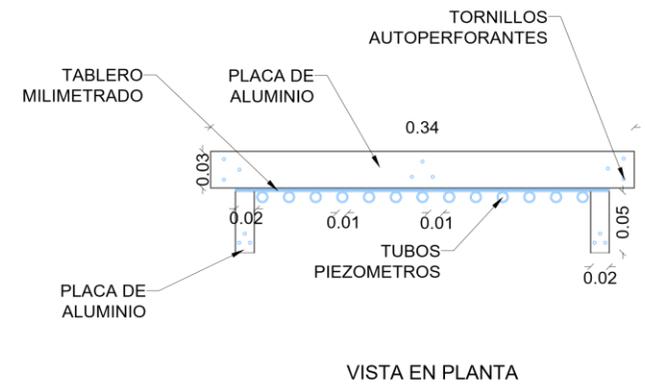
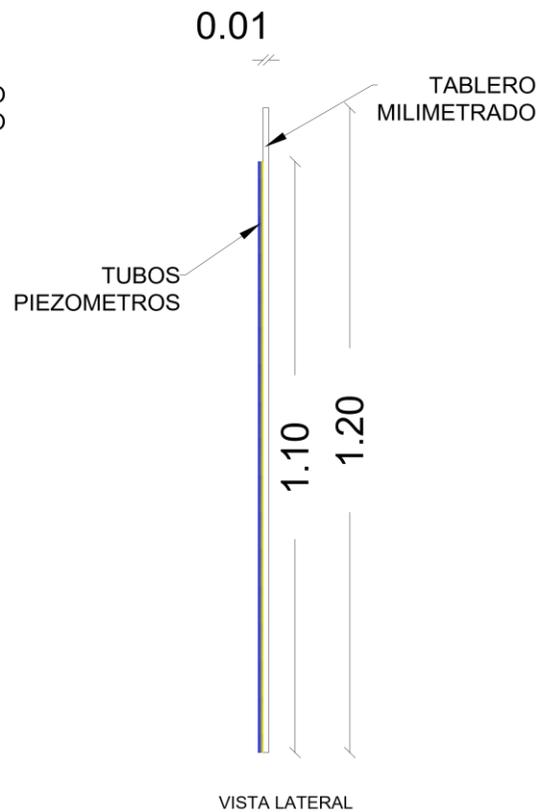
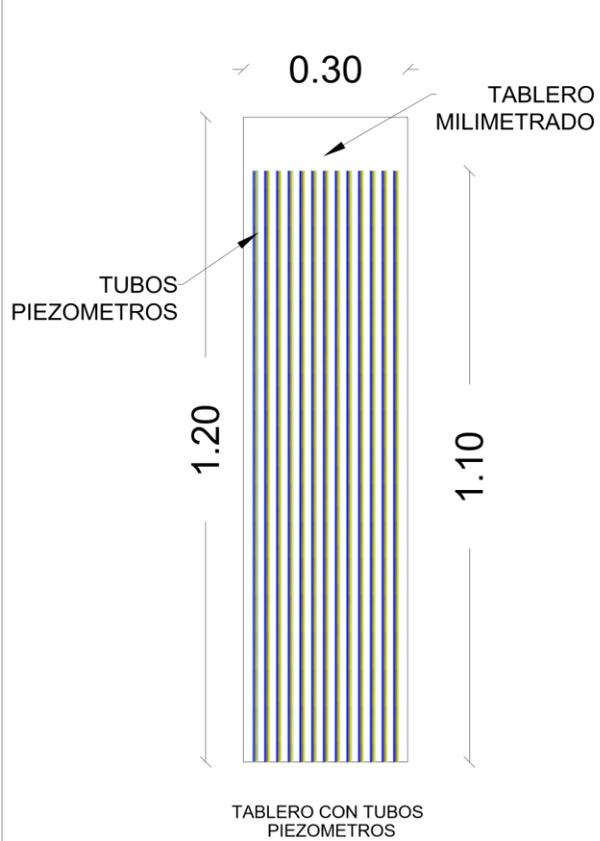
OPINIÓN DEL TUTOR:  
DOLODAR EL NOMBRE  
INGENIERO CIVIL

ESCALA:  
1:250

FECHA:  
OCTUBRE  
2020

PÁGINA:  
2/3





UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

PROYECTO:

DISEÑO DE PERMEAMETRO

CONTIENE:

TABLERO CON TUBOS PIEZOMÉTRICOS  
VISTA LATERAL Y PLANTA

REALIZADO POR:

DANIEL CABEZAS.  
EGRESADO

REVISÓ POR:

ANA MARIA AMAYA.  
EGRESADA

REVISÓ POR:

COLOCAR EL NOMBRE  
INGENIERO CIVIL

ESCALA:

1:250

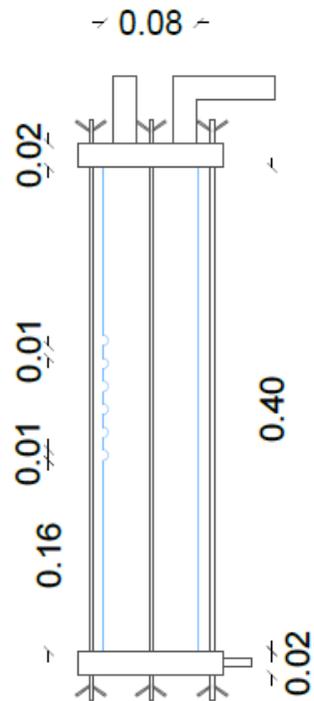
FECHA:

OCTUBRE  
2020

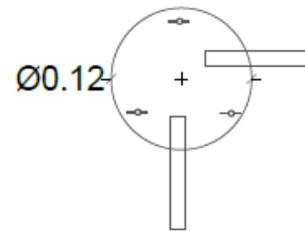
LÁMINA:

3/5

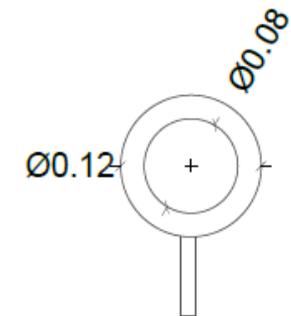




CILINDRO

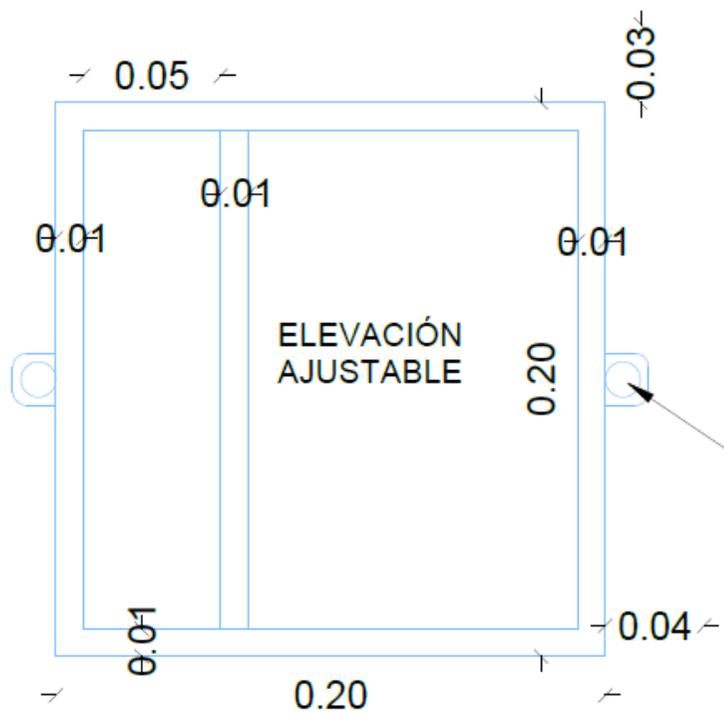


TAPA SUPERIOR

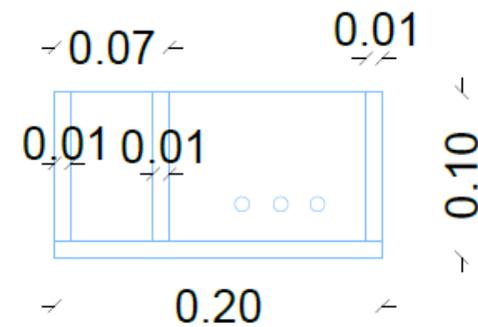


TAPA INFERIOR

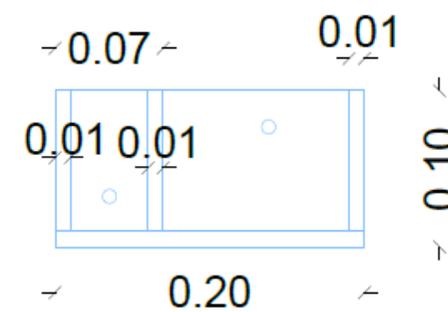
|  |  |                                      |   |                 |        |
|--|--|--------------------------------------|---|-----------------|--------|
|  | <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b><br><b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> |                                      |  |                 |        |
|  | PROFESOR:  | DISEÑO DE PERMEAMETRO                |   |                 |        |
|  | DISEÑADO POR:  | ANÁLISIS POR:                        | REVISADO POR:   | ESCALA:         | FECHA: |
| DANIEL CABEZAS.<br>EGRESADO  | ANA MARÍA AMAYA.<br>EGRESADA   | COLOCAR EL NOMBRE<br>INGENIERO CIVIL | 1:250   | OCTUBRE<br>2020 | 4/5    |



VISTA EN PLANTA TANQUE



VISTA FRONTAL



VISTA POSTERIOR

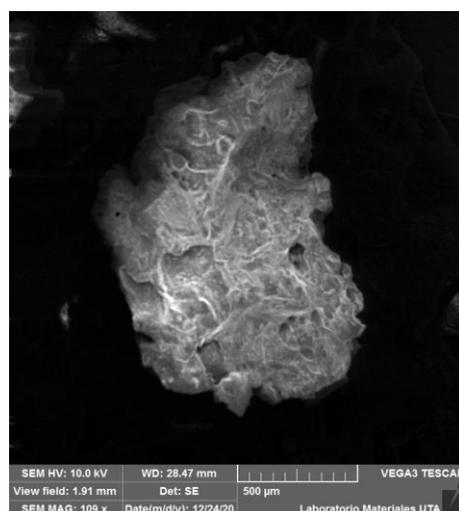
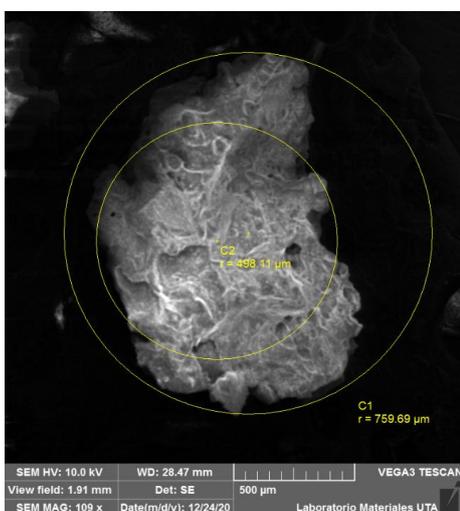
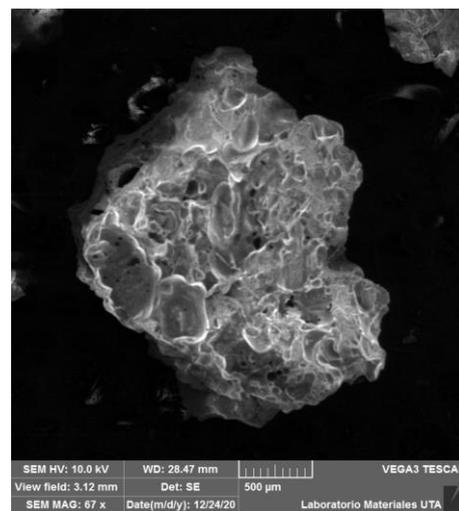
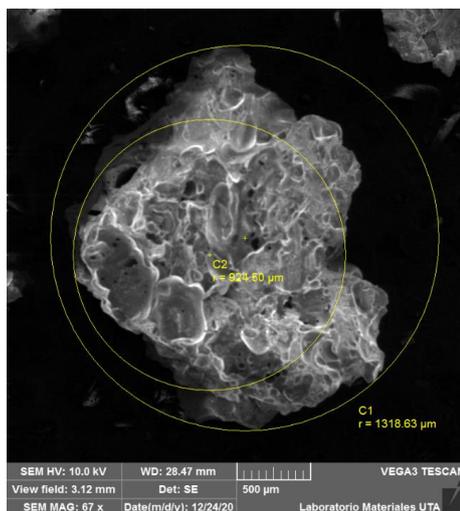
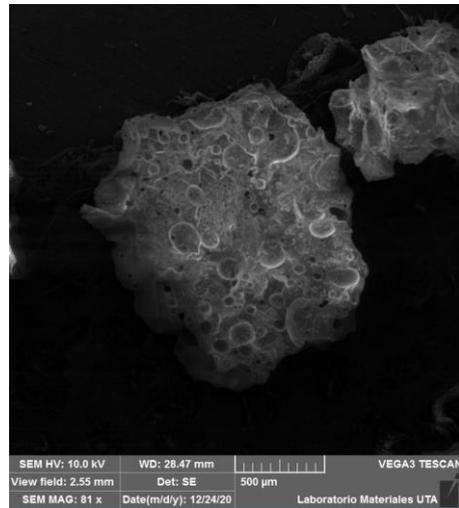
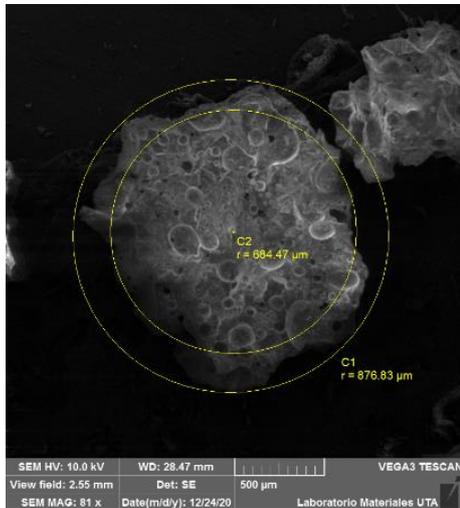


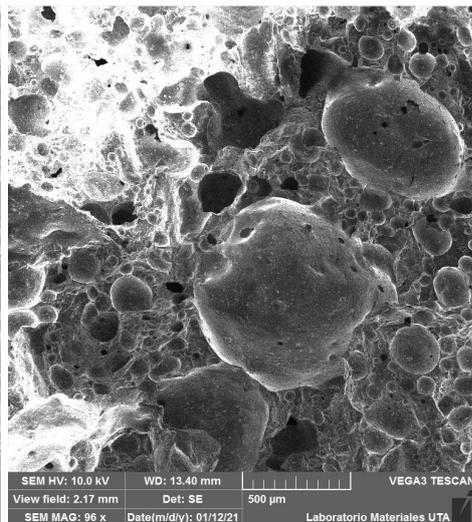
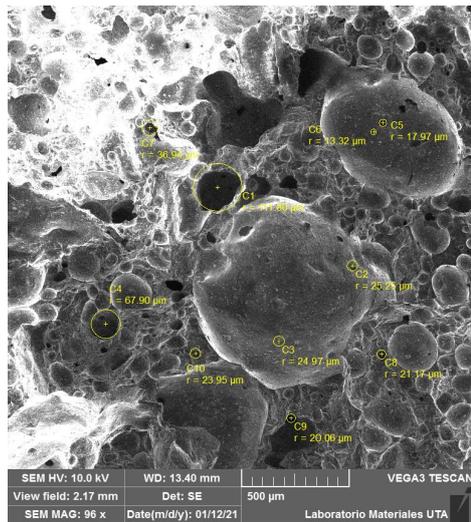
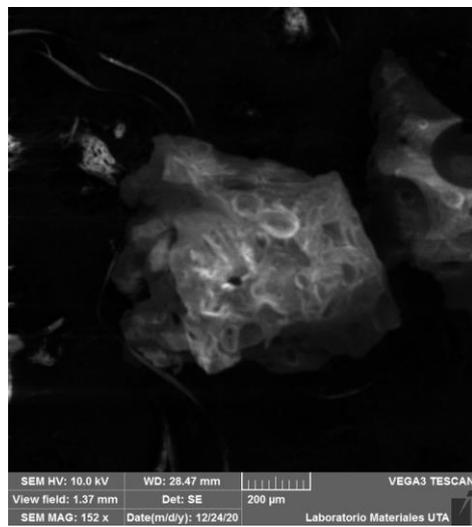
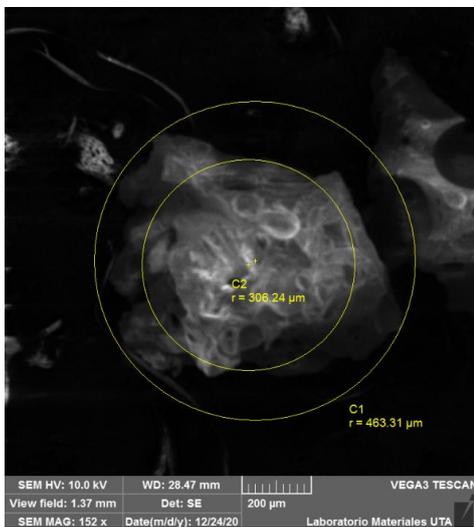
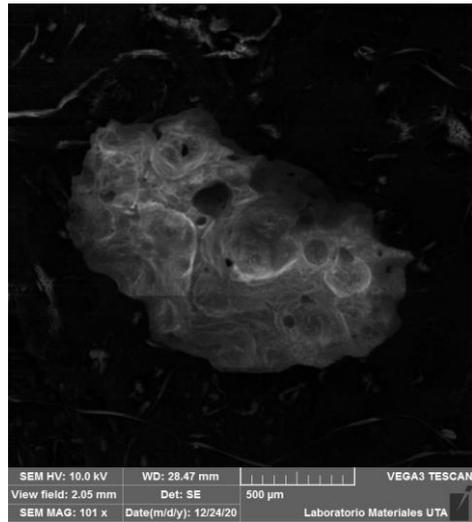
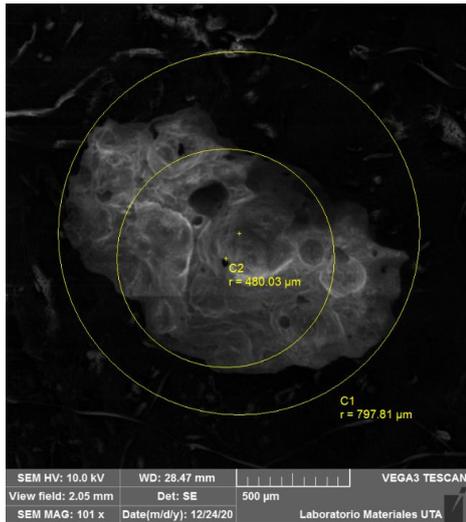
|   |  |   |  |                               |                       |
|---|--|---|--|-------------------------------|-----------------------|
| <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b>            |  |   |  |                               |                       |
| <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b>  |  |   |  |                               |                       |
| NOMBRE:<br><b>DISEÑO DE PERMEAMETRO</b>         |  |   | CONTENIDO:<br><b>TANQUE VISTA EN PLANTA Y PERFIL</b> |                               |                       |
| REVISADO POR:<br><b>DANIEL CABEZAS EGREBADO</b> | ANÁLISIS POR:<br><b>ANA MARÍA AMAYA EGREBADA</b> | REVISADO POR:<br><b>COLOCAR EL NOMBRE INGENIERO CIVIL</b> | ESCALA:<br><b>1:250</b>                              | FECHA:<br><b>OCTUBRE 2020</b> | LÁMINA:<br><b>5/5</b> |



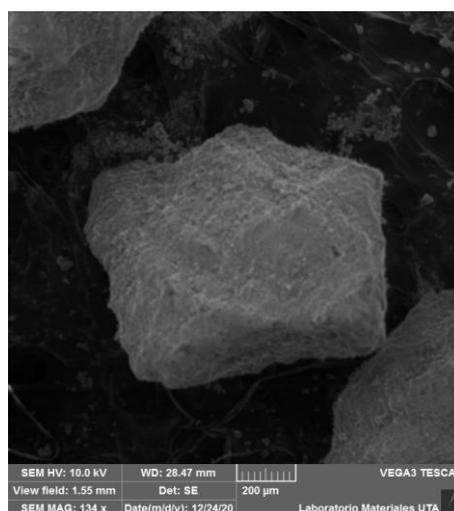
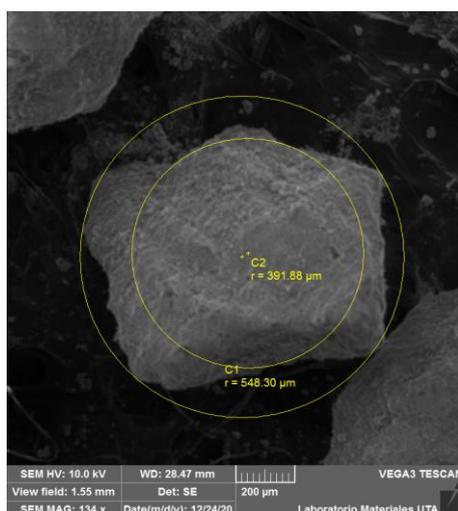
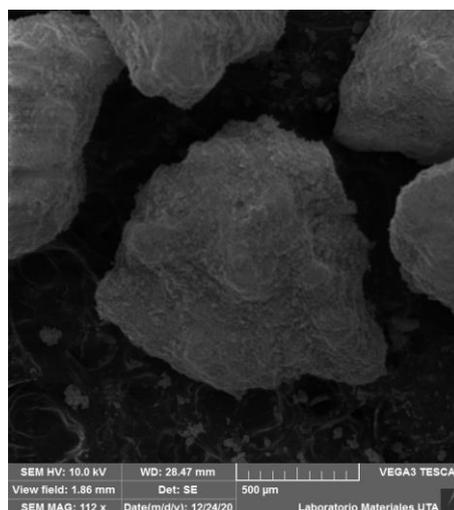
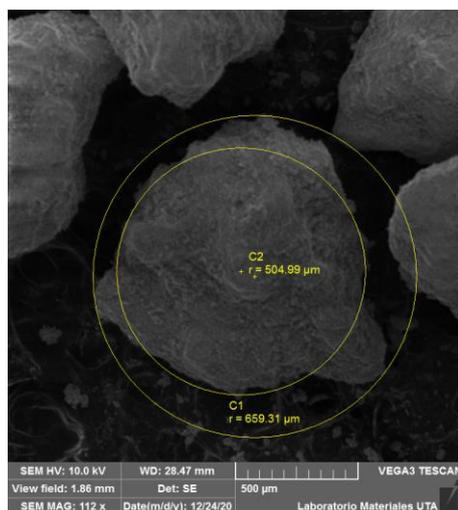
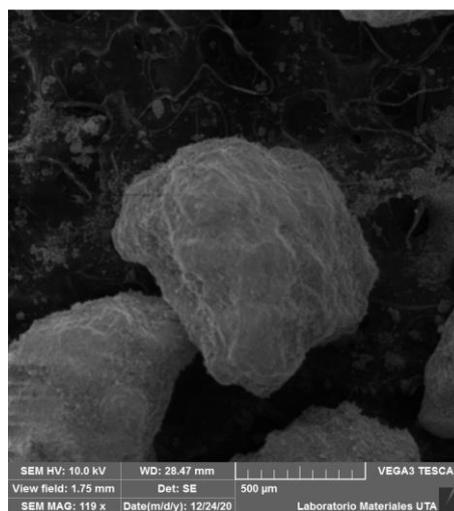
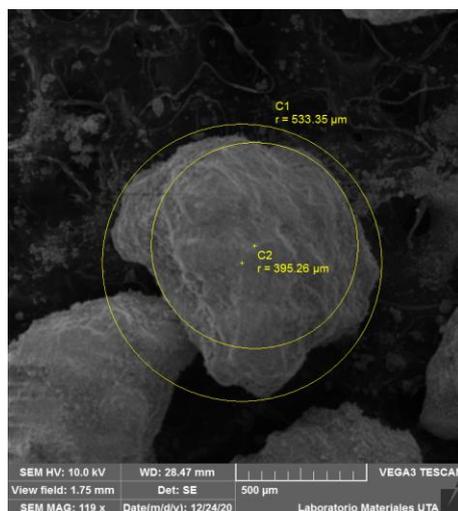
## 6.3 FOTOGRAFÍAS OBTENIDAS DEL MICROSCOPIO DE BARRIDO DE CADA SUSTANCIA REACTIVA

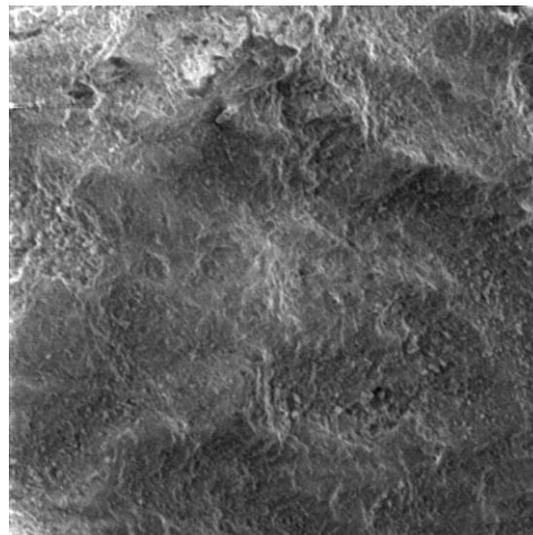
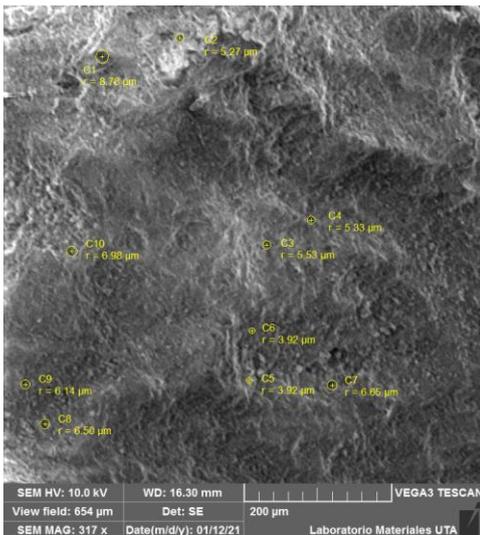
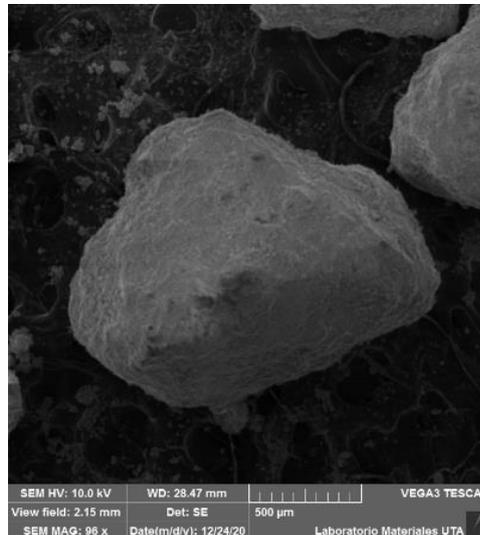
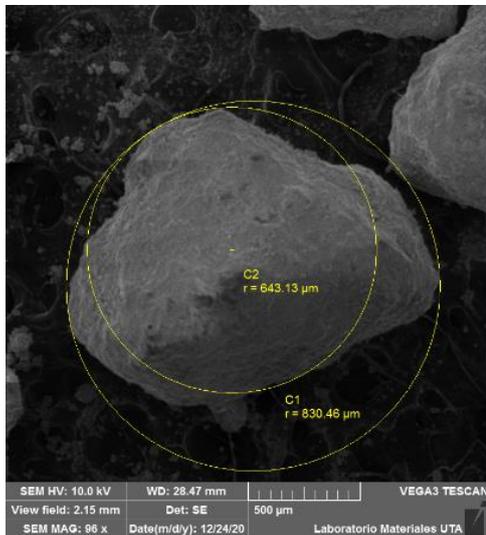
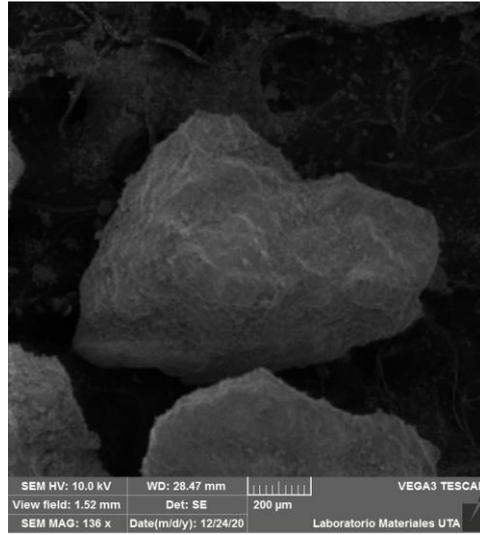
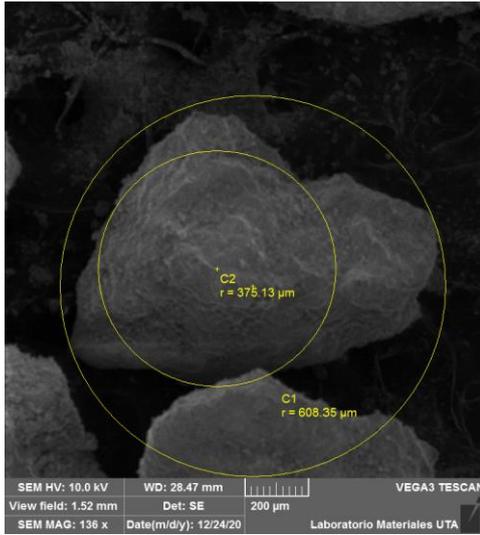
### 6.3.1 PIROCLASTO VOLCÁNICO



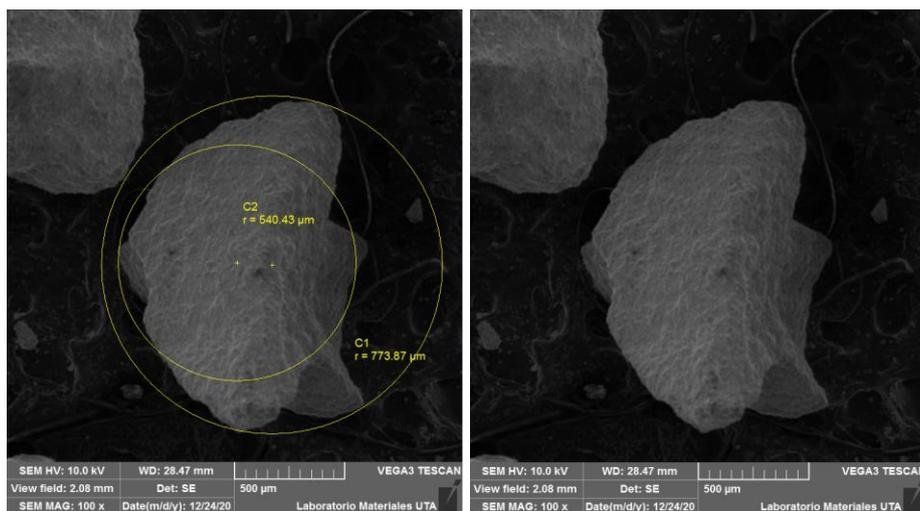
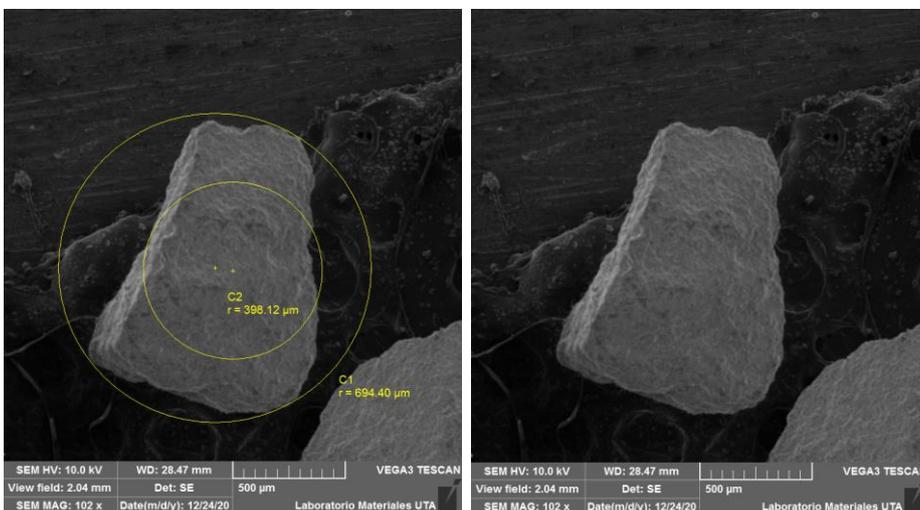
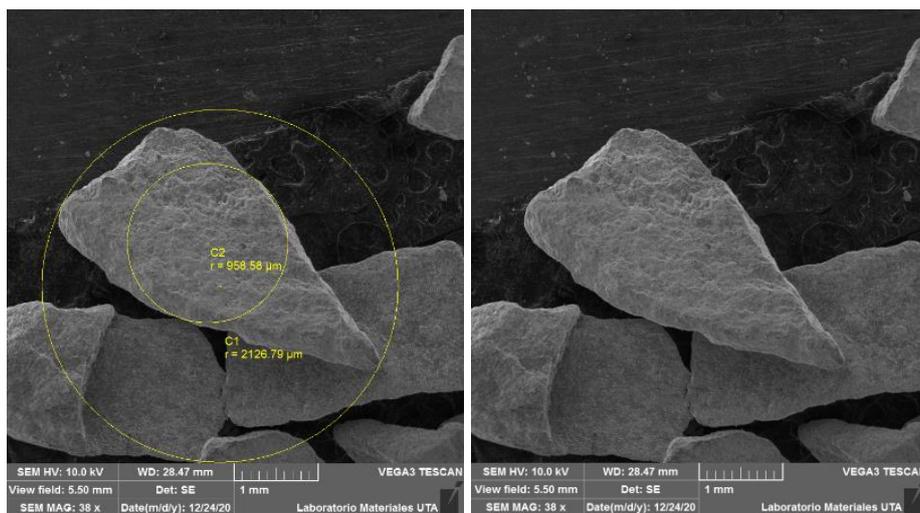


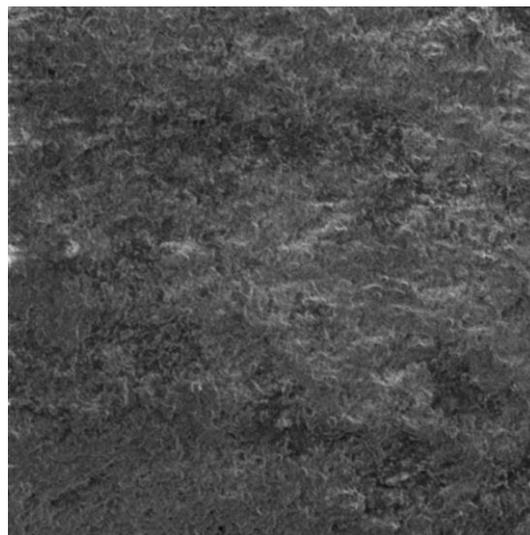
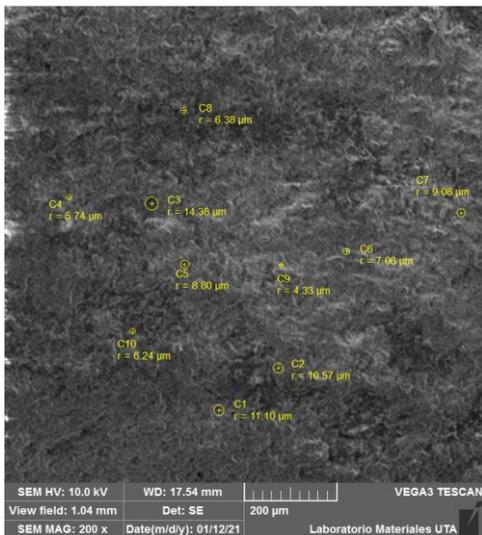
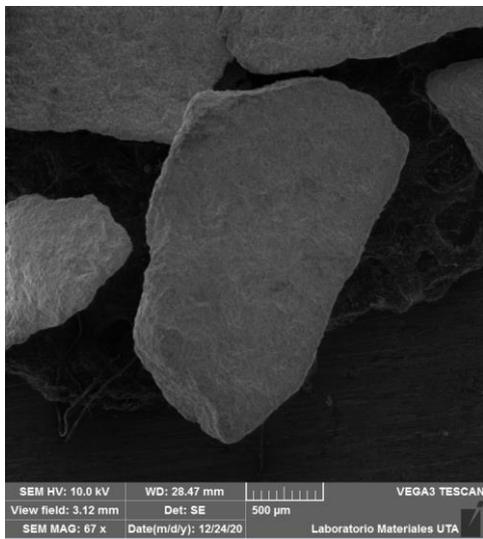
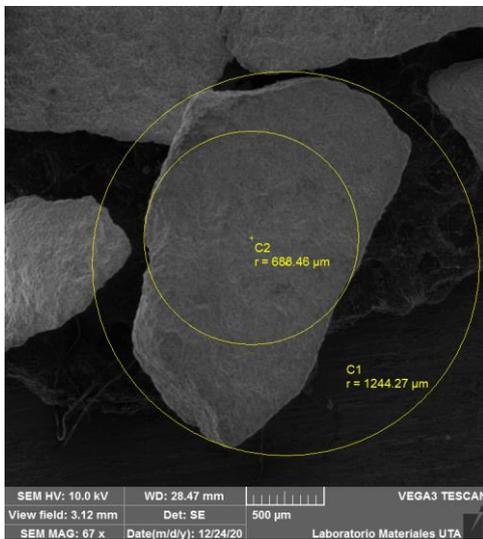
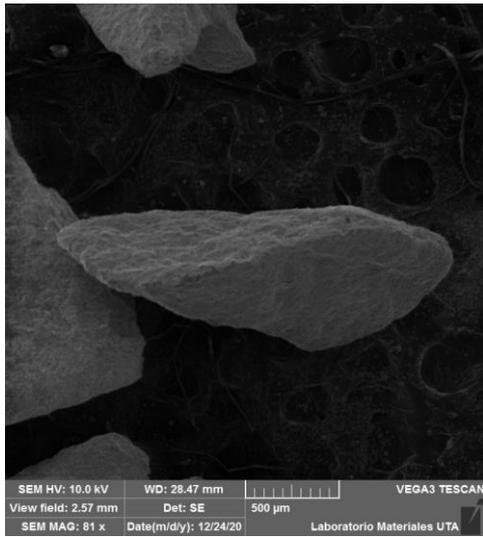
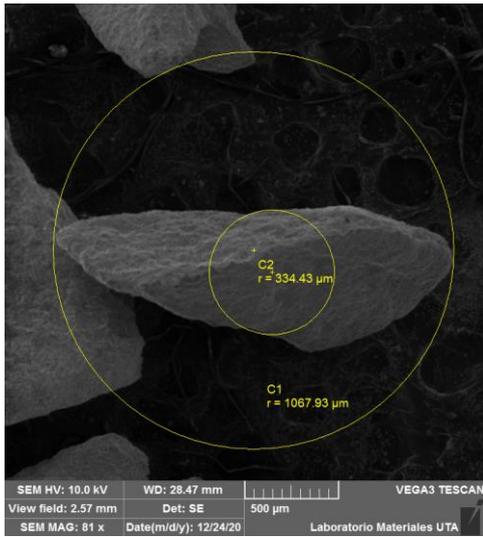
## 6.4.1 ZEOLITA CLINOPTILOLITA





## 6.5.1 ZEOLITA MORDENITA





## 6.4 FICHA TÉCNICA SUSTANCIA REACTIVA



# SUMIWATER



## FICHA TÉCNICA

# ZEOLITA

## MEDIA DE HYPER FILTRACIÓN



**CERTIFICACIÓN** NSF International



# Turbidex Zeolita

Turbidex es la última generación en medios de filtración de agua. La arena tradicional y la multimedia fueron satisfactorias para algunos tratamientos de agua, pero las industrias que requieren agua casi pura necesitan un medio que tenga mejores resultados, además de ahorro de tiempo y dinero.



**USO IDEAL PARA:**

- Industria
- Acuicultura
- Plantas Municipales
- Agricultura
- Comercios
- Farmacéutica
- Bebidas y alimenticia
- Fabricación y maquila
- Tratamiento de aguas
- Lavado de autos (car wash)

### ¿Qué es Turbidex?

Turbidex es un mineral de aluminosilicato de alta área superficial (Zeolita) que proporciona una filtración excepcional de sólidos en suspensión. La naturaleza macro porosa de Turbidex permite la filtración a 5 micrones o micras de tamaño de partícula.

La superficie irregular y la extensa porosidad de Turbidex lo convierten en el medio de filtración perfecto para cualquier aplicación donde la eliminación de sólidos es esencial para el proceso.

**Beneficios:**

- Eficiencia de hiperfiltración

Con una eficiencia de filtración en el rango de 3 a 5 micras, el rendimiento de Turbidex resulta en un ahorro de costos de productos químicos, cartuchos filtrantes, limpieza de membranas, vida de las membranas, etc.



## Flujo más altos

Con flujo de servicio nominales de hasta 15 gpm / ft2 en filtros de presión, Turbidex permite ahorros significativos en los costos iniciales del equipo en comparación con los medios tradicionales de multimedia. Turbidex permite caudales máximos de hasta 20 gpm / ft2 Turbidex.

## Claridad de agua superior

Los medios tradicionales de filtración de sedimentos dependen del esfuerzo mecánico para eliminar los sólidos suspendidos para reducir la turbidez. El medio de filtración Turbidex no solo es por su superficie, sino que al ser poroso aumenta esa capacidad de filtrado, actúa un poco como intercambiador iónico. Ayuda la sedimentación y floculación para producir agua cristalina hasta <0.1 NTU de turbidez.

## Ahorro de agua

La capacidad de carga de los medios Turbidex es hasta 1.5 veces mayor que la de los medios múltiples y hasta 2.8 veces mayor que la de los filtros de arena. Esto da como resultado tiempos de ejecución más largos con menos retrolavado frecuente, lo que resulta en un importante ahorro de agua.

## Medios ligeros

Con un peso de un 50-70% menos que los medios tradicionales, el uso de Turbidex dará como resultado ahorros sustanciales de flete o en el movimiento o carga del material.

## Más fácil de inventariar e instalar

Colocar un solo medio en vez de múltiples medios (arenas, antracitas, garnet...) simplifica el pedido, el envío y el almacenamiento. Cargar un medio permite una instalación rápida y fácil.

### CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

|                             |                           |
|-----------------------------|---------------------------|
| COLOR:                      | BLANCO                    |
| DENSIDAD DE MASA:           | 50 LBS./FT <sup>3</sup>   |
| SUPERFICIE:                 | 14 A 25 M <sup>2</sup> /G |
| TAMAÑO DE LA MALLA:         | 14X30                     |
| COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD: | 1.64                      |



|  |   |                        |
|--|---|------------------------|
| Fecha de emisión: Marzo 1994   | Revisión: 08/02/04  | Revisión: N°1          |
| <b>Sección 1. Identificación del producto</b>  |   |                        |
| Nombre del producto: TURBIDEX - Gránulos de relleno  |   |                        |
| Nombre químico: Clinoptilolita Zeolita / Potasio, Calcio, Aluminio, Sodio, Hidratado   |   |                        |
| Fórmula: (K <sub>2</sub> , Ca <sub>2</sub> , Na) O · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 10SiO <sub>2</sub> · 8H <sub>2</sub> O   |   |                        |
| Registro CAS: 12173-10-3   |   |                        |
| <b>Sección 2. Ingredientes del producto</b>  |   |                        |
| Nombre   | Porcentaje  | OSHA PEL y/o ACGIH TLV |
| Mineral de zeolita natural GRANULOS  | 100   | 0.5 mg/m <sup>3</sup>  |
| <b>Sección 3. Propiedades físicas y químicas</b>   |   |                        |
| RANGO DE CALENTAMIENTO   | No se aplica.   |                        |
| Gravedad específica  | 2.2 - 2.4   |                        |
| Tasa de evaporación  | No se aplica.   |                        |
| Densidad de vapor (Atr=1)  | No se aplica.   |                        |
| % Peso volátil   | No se aplica.   |                        |
| Apariencia física  | Gránulos blanquecinos/verdes  |                        |
| <b>Sección 4. Datos sobre incendios y explosiones</b>  |   |                        |
| Clasificación de la inflamabilidad   | No se aplica.   |                        |
| Punto de inflamación   | No se aplica.   |                        |
| Medios de extinción  | No se aplica.   |                        |
| Peligros inusuales de incendio y explosión   | Ninguno   |                        |
| <b>Sección 5. Datos sobre peligros para la salud</b>   |   |                        |
| <small>Atención: Este producto contiene sílice cristalina. La inhalación a largo plazo de polvo de sílice cristalina puede causar una enfermedad pulmonar (silicosis). IARC, una entidad de la Organización Mundial de la Salud, ha declarado: "Las pruebas limitadas de la carcinogenicidad de la sílice cristalina para los humanos", el NTP y la OSHA no han clasificado este producto como un carcinógeno. La sílice cristalina se evalúa en cantidades inferiores al 1% de OCS.</small> |   |                        |
| Condiciones médicas que pueden ser agravadas   | Irritación de las vías respiratorias superiores y enfermedad pulmonar preexistente                              |                        |
| Organos de destino   | Pulmones  |                        |
| Ruta de entrada principal  | Inhalación  |                        |
| Efectos reales sobre la salud  | Irritante respiratorio superior transitorio.  |                        |
| Efectos crónicos sobre la salud  | La inhalación a largo plazo de polvo de sílice cristalina puede causar una enfermedad pulmonar (silicosis).     |                        |
| Contacto visual  | Irritación y/o inflamación temporal   |                        |
| Contacto con la piel / absorción   | No se aplica.   |                        |
| Inhalación   | Tos y/o irritación de la nariz y la lengua.   |                        |
| Indigestión  | No es peligroso   |                        |
| <b>Sección 5. Datos de reactividad</b>   |   |                        |
| Estabilidad  | Estable   |                        |
| Incompatibilidad   | No se sabe nada.  |                        |
| Descomposición o subproductos peligrosos   | No se sabe nada.  |                        |
| Condiciones para un vacío  | No se sabe nada.  |                        |
| <b>Sección 6. Procedimientos de derrame o fuga</b>   |   |                        |
| PASOS A SEGUIR EN CASO DE QUE EL MATERIAL SE LIBERE O SE ESCAPE  | Evitar la formación de polvo, colocar en un contenedor de residuos adecuados.                                   |                        |
| Eliminación de residuos  | Eliminación del material de acuerdo con los reglamentos locales, estatales y federales.                         |                        |
| Peligros ambientales   | No se sabe nada.  |                        |
| Manipulación / Almacenamiento  | Almacenar en un lugar seco, mantener las buenas prácticas de la casa.   |                        |
| <b>Sección 7. Manejo y uso seguro de la información</b>  |   |                        |
| PROTECCIÓN RESPIRATORIA  | Usar respiradores aprobados por la NIOSH para protegerse de los polvos productores de silicosis.                |                        |
| GUANTES PROTECTORES  | No requiere   |                        |
| PROTECCIÓN DE OJOS   | Un contacto ocular malo, pestos de seguridad pueden ser necesarios.   |                        |
| VENTILACION  | Usar la ventilación adecuada y/o la nebulización de polvo para mantener los niveles de polvo por debajo de PEL. |                        |
| OTRAS ROPAS Y EQUIPOS DE PROTECCIÓN  | No requiere   |                        |
| <b>Sección 7. Procedimientos de primeros auxilios de emergencia</b>  |   |                        |
| Inhalación   | Quitar del área polvorienta el agua de bebida para limpiar  |                        |
| Indigestión  | No se aplica.   |                        |
| Contacto con la piel / absorción   | No se aplica.   |                        |
| Ojos   | Enjuagar con agua   |                        |