

**Comportamiento mecánico de suelos para la construcción de tapia pisada en Curití,  
Barichara y Piedecuesta en función de su composición granulométrica**

**Laura Julieth Ortiz Barón**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil**

**Director**

**German Hernando Acevedo Calderón**

**Magíster en Ingeniería Estructural**

**Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

**División de ingenierías y arquitectura**

**Ingeniería Civil**

**2023**

### **Dedicatoria**

A Dios por darme la oportunidad de cursar esta etapa universitaria siendo la fuente de sabiduría y amor, por sus bendiciones y fortaleza en los momentos más difíciles de mi vida. Así mismo, a mi mamá por ser mi apoyo incondicional, por esforzarse cada día para verme cumplir mis sueños, por ser la mejor animadora y motivadora y mi mayor inspiración. A mis tres hermanos por brindarme su apoyo, su amor y compañía en cada paso de este viaje. A mi tía Janise por estar siempre para mí, celebrar mis logros y apoyarme en cada paso de mi vida.

### **Agradecimientos**

A todas las personas que permitieron que este trabajo fuera posible:

MEng German Acevedo por ser el tutor líder de este proyecto de investigación, por su compromiso y dedicación para cumplir esta meta.

MEng Juan Camilo Jerez por las asesorías brindadas en diferentes puntos del proceso

Al personal del laboratorio por brindar su apoyo y colaboración

A mis amigos Jesús Durán y Alejandro Garnica por ser parte importante de este proyecto, por su apoyo y su ayuda para poder culminar este proceso, Gracias de corazón

## Contenido

Introducción .....	11
1. Comportamiento mecánico de suelos para la construcción de tapia pisada en Curití, Barichara y Piedecuesta en función de su composición granulométrica.....	13
1.1 Planteamiento del problema.....	13
1.2 Justificación.....	14
1.3 Objetivos .....	15
1.3.1 Objetivo general .....	15
1.3.2 Objetivos específicos .....	15
2. Marco referencial .....	16
2.1 Marco teórico .....	16
2.1.1 Técnica de construcción en tierra: Tapia Pisada .....	16
2.1.2 Composición de suelos para tierra apisonada.....	17
2.1.3 Contexto de la construcción en Tapia pisada en los municipios de Barichara, Curití y Piedecuesta .....	18
2.1.4 Ensayos de caracterización del suelo en el laboratorio .....	19
3. Método .....	23
3.1 Etapa 1: Búsqueda del material.....	23
3.2 Etapa 2: Caracterización del material.....	24
3.3 Etapa 3: Clasificación del material.....	24
3.4 Etapa 4: Fabricación de especímenes.....	25
3.5 Etapa 5: Ensayo de resistencia a la compresión .....	26
4. Resultados .....	27

4.1 Etapa 1: Búsqueda del material.....	27
4.2 Etapa 2: Ensayos de caracterización .....	29
4.2.1 Determinación del tamaño de partículas INV E-123.....	29
4.2.2 Determinación de limite líquido.....	32
4.2.3 Determinación del límite plástico.....	33
4.2.4 Ensayo de determinación del contenido de humedad en las muestras .....	33
4.2.5 Ensayo de determinación de Gravedad especifica .....	34
4.2.6 Ensayo de Proctor modificado.....	35
4.3 Etapa 3: Clasificación de las muestras .....	40
4.3.1 Piedecuesta .....	40
4.3.2 Curití.....	41
4.3.4 Barichara.....	41
4.4 Etapa 4: Fabricación de especímenes.....	42
5.1 análisis de la caracterización de los materiales .....	51
5.2 Análisis de dispersión del ensayo de compresión simple.....	52
5.3 Análisis de esfuerzo vs deformación unitaria .....	54
6. Conclusiones .....	59
Referencias.....	62

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1.</b> <i>Granulometría de la muestra de Piedecuesta</i> .....	30
<b>Tabla 2.</b> <i>Granulometría de la muestra de Curití</i> .....	31
<b>Tabla 3.</b> <i>Granulometría de la muestra de Barichara</i> .....	31
<b>Tabla 4.</b> <i>Resultado de la Granulometría para las tres muestras</i> .....	31
<b>Tabla 5.</b> <i>Resultados de los límites líquidos</i> .....	33
<b>Tabla 6.</b> <i>Resultados del límite plástico</i> .....	33
<b>Tabla 7.</b> <i>Resultados del ensayo de determinación de humedad</i> .....	34
<b>Tabla 8.</b> <i>Resultados de ensayo de gravedad específica de las muestras</i> .....	35
<b>Tabla 9.</b> <i>Resultados Proctor modificado Piedecuesta</i> .....	36
<b>Tabla 10.</b> <i>Resultados de Proctor Curití</i> .....	38
<b>Tabla 11.</b> <i>Resultados del Proctor Barichara</i> .....	39
<b>Tabla 12.</b> <i>Resultados de ensayo a compresión muestras de Curití</i> .....	47
<b>Tabla 13.</b> <i>Resultados de ensayo a compresión Especímenes de Barichara</i> .....	47
<b>Tabla 14.</b> <i>Resultados de ensayo a compresión de especímenes de Piedecuesta</i> .....	48
<b>Tabla 15.</b> <i>Composición recomendada Manual del SENA</i> .....	52
<b>Tabla 16.</b> <i>Desviación estándar de datos de carga entre cada espécimen por modificación</i> .....	52

**Lista de figuras**

<b>Figura 1.</b> <i>Diagrama de metodología</i> .....	23
<b>Figura 2.</b> <i>Municipios analizados</i> .....	27
<b>Figura 3.</b> <i>Muestras de suelo de Piedecuesta, Curití y Barichara</i> .....	28
<b>Figura 4.</b> <i>Proceso de Lavado de las muestras</i> .....	29
<b>Figura 5.</b> <i>Proceso de tamizado de las muestras</i> .....	30
<b>Figura 6.</b> <i>Equipo LL y LP</i> .....	32
<b>Figura 7.</b> <i>Límites de las muestras de suelo de Piedecuesta, Curití y Barichara respectivamente</i> .....	32
<b>Figura 8.</b> <i>Muestras de Limite plástico</i> .....	33
<b>Figura 9.</b> <i>Ensayo de gravedad especifica Piedecuesta</i> .....	34
<b>Figura 10.</b> <i>Muestras de ensayo de gravedad especifica Curití y Barichara</i> .....	34
<b>Figura 11.</b> <i>Ensayo de Proctor modificado: Muestra de Piedecuesta</i> .....	36
<b>Figura 12.</b> <i>Curva de compactación Piedecuesta</i> .....	37
<b>Figura 13.</b> <i>Ensayo de Proctor modificado: Curití</i> .....	37
<b>Figura 14.</b> <i>Curva de compactación Curití</i> .....	38
<b>Figura 15.</b> <i>Ensayo de Proctor: Barichara</i> .....	39
<b>Figura 16.</b> <i>Curva de compactación Barichara</i> .....	40
<b>Figura 17.</b> <i>Carta de Casa Grande: Muestra Piedecuesta</i> .....	40
<b>Figura 18.</b> <i>Carta de Casa Grande: Muestra Curití</i> .....	41
<b>Figura 19.</b> <i>Carta de Casa Grande: Muestra Barichara</i> .....	41
<b>Figura 20.</b> <i>Proceso de elaboración de los especímenes</i> .....	42
<b>Figura 21.</b> <i>Proceso de modificación de la composición granulométrica</i> .....	43

<b>Figura 22.</b> <i>Modificación del suelo de Piedecuesta y Curití, finos y gruesos</i> .....	43
<b>Figura 23.</b> <i>Modificación del suelo de Barichara, finos y gruesos</i> .....	43
<b>Figura 24.</b> <i>Especímenes del suelo del municipio de Curití</i> .....	44
<b>Figura 25.</b> <i>Especímenes en Perfil de Curití</i> .....	44
<b>Figura 26.</b> <i>Especímenes de las muestras de suelo Barichara</i> .....	44
<b>Figura 27.</b> <i>Especímenes perfil suelo de Barichara</i> .....	45
<b>Figura 28.</b> <i>Especímenes de suelo de Piedecuesta</i> .....	45
<b>Figura 29.</b> <i>Especímenes perfil suelo de Piedecuesta</i> .....	45
<b>Figura 30.</b> <i>Periodo de Curado de 28 días de cada espécimen</i> .....	46
<b>Figura 31.</b> <i>Ensayo de compresión confinada (INV E -152)</i> .....	46
<b>Figura 32.</b> <i>Esfuerzo vs composición de las muestras de Curití</i> .....	47
<b>Figura 33.</b> <i>Esfuerzo vs composición de las muestras de Barichara</i> .....	48
<b>Figura 34.</b> <i>Esfuerzo vs composición de las muestras de Piedecuesta</i> .....	48
<b>Figura 35.</b> <i>Modos de falla especímenes de Curití</i> .....	49
<b>Figura 36.</b> <i>Modos de falla de los especímenes del municipio de Piedecuesta</i> .....	50
<b>Figura 37.</b> <i>Modos de falla especímenes de Barichara</i> .....	50
<b>Figura 38.</b> <i>Porcentaje de material que compone las muestras</i> .....	51
<b>Figura 39.</b> <i>Tendencia de desviaciones estándar entre las muestras analizadas</i> .....	53
<b>Figura 40.</b> <i>Curva esfuerzo vs Deformación unitaria (Especímenes de Curití)</i> .....	54
<b>Figura 41.</b> <i>Curva esfuerzo vs deformación unitario municipio de Barichara</i> .....	56
<b>Figura 42.</b> <i>Curva esfuerzo vs deformación unitaria de los especímenes del municipio de Piedecuesta</i> .....	57
<b>Figura 43.</b> <i>Grafica comparativa de resultados de las diferentes muestras</i> .....	58

### **Resumen**

La tapia pisada corresponde a un sistema constructivo vernáculo arraigado en la cultura andina ancestral. Los sistemas en tierra poseen un importante atractivo económico y ambiental que no ha sido muy explotado debido a la incertidumbre que pueden generar por la carencia de estudios técnicos al respecto. Por esta razón, la presente investigación se basó en caracterizar el suelo disponible para la construcción en tapia pisada en los municipios de Curití, Barichara y Piedecuesta analizando su comportamiento mecánico a compresión frente a cinco diferentes composiciones granulométricas, fundamentada en los ensayos de laboratorio establecidos en la normativa colombiana INVIAS y siguiendo las recomendaciones de la normativa peruana E-80. De lo cual se pudo concluir los materiales con mayor presencia de finos presentan una mejor capacidad portante en contraste con los gruesos. Así mismo, se evidenció que debe existir una proporción arenas/finos de modo que matriz tenga cohesión y rigidez suficiente para generar una condición de estabilidad que garantice un buen comportamiento.

*Palabras clave:* tapia pisada, composición granulométrica, resistencia, compresión

**Abstract**

The rammed earth corresponds to a vernacular constructive system rooted in the ancestral Andean culture. Land-based systems have an important economic and environmental attraction that has not been widely exploited due to the uncertainty they can generate due to the lack of technical studies in this regard. For this reason, the present investigation was based on characterizing the soil available for the construction in rammed earth in the municipalities of Curití, Barichara and Piedecuesta analyzing its mechanical behavior in compression against five different granulometric compositions, based on laboratory tests established in the Colombian INVIAS regulations and following the recommendations of the Peruvian E-80 regulations. From which it was possible to conclude the materials with greater presence of fines present a better carrying capacity in contrast to the thick ones. Likewise, it was evident that there must be a sand/fine ratio so that the matrix has sufficient cohesion and rigidity to generate a stability condition that guarantees good behavior.

*Keywords:* rammed earth, granulometric composition, strength, compression

## Introducción

El uso de la tierra como material de construcción en el territorio americano, se remonta a culturas como la Muisca cuyas construcciones se realizaban en tierra armada [1]. La implementación de este material en la construcción se ha realizado a lo largo de la historia de manera empírica, siendo un medio de promoción de la tradición y la cultura de los antepasados.

En Colombia la tapia pisada se ha logrado mantener en el tiempo gracias al relieve que se presenta en las diferentes zonas del país, así como la tasa de sismicidad [2]. Sin embargo, la llegada de la industrialización y nuevos materiales más eficientes en comportamiento desplazaron paulatinamente el uso de las técnicas de construcción en tierra.

En los últimos años el desarrollo de materiales industrializados para el sector de la construcción ha contribuido al auge de la contaminación, el cambio climático y el efecto invernadero que se han constituido en factores preocupantes que vulneran la calidad de vida de las comunidades, provocando deterioro ambiental a través de uso indiscriminado de recurso y energía para la fabricación de insumos [3]. De ahí, que es necesario orientar la mirada de la industria en búsqueda de materiales ecológicos que permitan disminuir la huella ambiental de este sector productivo e industrial.

La tierra como material posee un comportamiento mecánico poco analizado que genera incertidumbre, ya que presenta una amplia variabilidad en función de las condiciones donde se desarrolla y las variables involucradas [4]. Sin embargo, el estudio y conocimiento de los sistemas constructivos en tierra y las especificaciones de los materiales pueden generar herramientas que permitan el aprovechamiento del material en función de su comportamiento, economía, practicidad y beneficios ambientales. De manera, que se puedan disminuir el aporte de la industria a las emisiones de gases de efecto invernadero, se promueva una técnica ancestral de una manera más

tecnificada, la preservación del patrimonio cultural material e inmaterial de la humanidad, entre otras problemáticas que se verían beneficiadas con el conocimiento técnico producto de investigaciones de los sistemas constructivos en tierra.

Teniendo en cuenta los puntos anteriormente mencionados, el propósito de este estudio es analizar el efecto de la granulometría o composición en comportamiento mecánico a compresión de los suelos disponibles para la construcción en tapia pisada para los municipios de Barichara, Curití y Piedecuesta. Con el objeto de establecer la composición óptima para cada tipo de material en función de su capacidad portante y características físicas.

## **1. Comportamiento mecánico de suelos para la construcción de tapia pisada en Curití, Barichara y Piedecuesta en función de su composición granulométrica**

### **1.1 Planteamiento del problema**

Las construcciones vernáculas o en tierra son formas representativas y endémicas de los diferentes departamentos de Colombia, partiendo del principio de la implementación de materiales propios de cada territorio como material de construcción para satisfacer la necesidad de vivienda, siendo uno de los casos más representativos el altiplano de los Santanderes, en donde predomina la tapia pisada debido a la abundancia de recursos naturales que se presenta en la región, siendo este parte del patrimonio cultural de la humanidad, sin embargo, la implementación de estas técnicas constructivas se ha ido desvaneciendo paulatinamente a causa del bajo estudio, la poca evolución de estas y la industrialización de los materiales de construcción, como también a los requerimientos sismorresistentes que se deben adaptar en las edificaciones [5], Si bien este material cuenta con un atractivo ambiental, en la actualidad existe pocos estudios relacionados con la caracterización mecánica de la tapia. [6]. Por lo tanto, Colombia carece de normatividad vigente para el diseño de estructuras en tierra, dejando de lado la sostenibilidad ambiental y la tradición cultural de la época de la colonización, a pesar de esto, en la hoy en día se evidencian construcciones de estas tipologías esencialmente en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Santander, en edificaciones de centros poblados a manera de vivienda, equipamientos e inmuebles comerciales, como también en unidades de vivienda rural tradicional [5], levantadas por artesanos que ven en la tierra un material ambientalmente aconsejable para el uso en construcción.

La necesidad de vivienda digna y la búsqueda de materiales de bioconstrucción ha orientado su visión a la tierra cruda como material estructural, sin embargo, existe mucha incertidumbre con respecto al comportamiento de los sistemas en tierra debido a los limitados análisis técnicos de las

propiedades físico-mecánicas y de las solicitaciones a las que se ven expuestas, careciendo de estudios suficientes que permitan alcanzar niveles adecuados de seguridad en este tipo de edificaciones [6], por lo tanto, se hace necesario conocer la influencia de la composición granulométrica en el comportamiento mecánico de la tapia pisada de los suelos disponibles en los municipios de Santander, ya que las características mecánicas, son las que condicionan el desempeño del sistema estructural ante condiciones dinámicas [7], de esta forma se obtiene un marco de referencia en cuanto a la calificación y cuantificación de las propiedades más relevantes para tener en cuenta en la construcción de esta técnica, proponiendo así, soluciones de intervención adecuados para los bienes de interés cultural, manteniendo las expectativas propias del hábitat y las necesidades espaciales de la actualidad.

## **1.2 Justificación**

La tapia pisada es un sistema constructivo que se basa en la tierra “cruda” como un material estructural. Por lo tanto, la tierra constituye la materia prima necesaria para la ejecución de esta clase de sistema.

La necesidad de involucrar materiales sostenibles en los procesos constructivos se ha incrementado con el paso de los años, debido al aumento de la contaminación generada por los materiales industriales. La tierra corresponde a un material ambientalmente amigable, según lo establece Guerrero. Esto debido a que tiene una gran disponibilidad en el planeta. Adicionalmente, su extracción y transformación no requiere un gran gasto de agua y energía, por lo que se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero [8].

Ahora bien, los sistemas en tierra son una alternativa para la construcción de vivienda digna para población vulnerable, según cifras del censo realizado por el departamento administrativo nacional de estadística (DANE) del 2020, en Santander existe un déficit habitacional del 23.9 %. De la misma manera, en las urbes rurales el 77% de la población no cuenta con una vivienda propia.[9]

La implementación de la construcción en tierra podría contribuir a las cifras anteriormente expuestas. Así mismo, esta técnica permite la practica colaborativa promoviendo la tradición y la cultura ancestral.

El uso tierra como material estructural a lo largo de la historia se ha realizado a “prueba y error” [8]. Sin tener un análisis cuantitativo que permitiera entender el comportamiento del material en función de su composición, sus propiedades y métodos constructivos [7]. Colombia, posee un importante patrimonio cultural construido a base de tapia pisada a lo largo de su territorio. Teniendo en cuenta que las características de la tierra son diferentes dependiendo de su ubicación y en función de estas se determina el comportamiento mecánico de la tapia. Se hace necesario profundizar en el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de la tapia pisada en función de la composición granulométrica de la tierra cruda empleada para la misma. Esto con el fin de determinar cómo se comporta la tapia a compresión en base a la implementación de suelo proveniente de diferentes municipios de Santander.

La presente investigación contribuye al conocimiento de los sistemas constructivos en tierra, los factores determinantes que influyen en el comportamiento de los mismo y sus propiedades.

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo general***

Comparar el comportamiento mecánico de los suelos en condiciones granulométricas naturales y modificadas para la construcción de tapia pisada de los municipios de Piedecuesta, Barichara y Curití.

### ***1.3.2 Objetivos específicos***

Caracterizar las propiedades físico-mecánicas de las muestras de suelo para la construcción de tapia pisada de los municipios de Piedecuesta, Curití y Barichara.

Evaluar la resistencia a la compresión de los especímenes en condiciones granulométricas naturales y modificadas para la construcción de tapia pisada.

Determinar la influencia de la composición granulométrica de los suelos en el comportamiento a compresión de la tapia pisada.

## **2. Marco referencial**

### **2.1 Marco teórico**

#### ***2.1.1 Técnica de construcción en tierra: Tapia Pisada***

La tapia pisada se define como un sistema de construcción en tierra cruda. Corresponde a una técnica In-situ vaciando la tierra húmeda en un molde denominado tapial, el material se compacta en bloques monolíticos a través de capas de 10 cm. [10]. Para esta técnica de construcción se necesita una correcta selección de la tierra como materia prima [11], debido a que las propiedades de la tapia van a depender directamente de la calidad del material implementado.

La Tapia se basa en un sistema de muros de carga con una resistencia a la compresión que responde ante las solicitaciones verticales y cargas estática de una construcción [1]. El sistema se construye a través de un encofrado denominado tapial que posee una altura entre 50-60 cm, en donde se vacía la mezcla de tierra húmeda y se compacta a través de pisón cuya base debe contar con un área comprendida entre 60 cm<sup>2</sup>-200 cm<sup>2</sup>. Adicionalmente, el peso del pisón debe oscilar entre 5-10 kg [12]. El espesor del muro es como mínimo 40 cm.

La implementación de esta técnica constructiva presenta ventajas notorias, como, por ejemplo, la resistencia al fuego, el bajo costo, el aislamiento térmico y acústico y el rápido proceso constructivo[13].

### ***2.1.2 Composición de suelos para tierra apisonada***

El suelo está constituido por partículas de diferentes tamaños que se agrupan de acuerdo con las dimensiones de sus granos. Sus características propias indican su comportamiento como material de construcción [14].

Debido a que cualquier clase de suelo no es apto para la construcción en tierra, se han desarrollado investigaciones que plantean establecer la composición adecuada para el material a implementar. El Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) propone una granulometría “ideal” para la tierra a utilizar, la cual consiste en: Grava (0%-15%), arena (40%-50%), limos (20%-35%) y arcillas (15-25%)[15].

Es importante resaltar que la arcilla es uno de los componentes esenciales de la tierra como materia prima para la tapia pisada ya que actúa como aglomerante para pegar las partículas de mayor tamaño [12]. Ahora bien, los minerales arcillosos están constituidos por capas alrededor de un núcleo de silicio o aluminio. Estos elementos poseen cargas negativas muy fuertes, lo que contribuye a una alta cohesión interlaminar [12] que a su vez influye en la resistencia de la matriz del suelo.

Por otro lado, la tierra está compuesta por limos, arenas y gravas los cuales al contrario de la arcilla no presentan fuerza aglutinante, sino que se encargan de proporcionar resistencia a compresión la matriz del material. Cuando la muestra a implementar cuenta con un contenido de arcilla que hace que la mezcla se torne como barro, el manual de construcción en tierra establece que se hace necesario rebajar el contenido de arcilla mediante la adición de agregados gruesos como la arena que permiten la optimización de la mezcla al estado deseado para poderla compactar. La Arena hace referencia a un

material de granos finos encontrado en el curso natural de muchos ríos, lagos costas y terrenos áridos. Constituye una gran parte de los suelos y sus tamaños de partícula varían entre 2 mm -0.05mm de diámetro [13].

Cuando se habla de suelos para la construcción, es necesario conocer que los lugares de explotación se constituyen por perfiles estratigráficos productos de procesos de pedogénesis a lo largo de los periodos históricos [16]. Donde se destaca el uso de los horizontes E, caracterizados por la pérdida por eluviación de las arcillas de silicato, aluminio o hierro ocasionando concentración alta de arenas y limos; Horizontes B caracterizados por una concentración aluvial de arcillas, hierro, aluminio, humus los cuales le producen al material una coloración más roja con respecto a los demás horizontes[14].

### ***2.1.3 Contexto de la construcción en Tapia pisada en los municipios de Barichara, Curití y Piedecuesta***

La tapia pisada corresponde a una técnica ancestral de construcción en tierra desarrollada como la solución a la necesidad de refugio de las civilizaciones antiguas. La tradición constructiva se ha mantenido en el tiempo en diferentes departamentos de Colombia dentro de los cuales se destaca Santander, lo anterior se debe a que el departamento cada vez más busca consolidarse como un atractivo turístico que promueva la cultura las tradiciones [17].

En este departamento, se encuentra un legado y patrimonio cultural heterogéneo [13]. Diferentes municipios han preservado sus tradiciones en el tiempo gracias a la disponibilidad del material y sus derivados. Lo anterior, según lo expresa Silva et al., debido a que el departamento tiene un potencial importante de material para la construcción en tierra [18].

El municipio más representativo por la implementación de la tapia pisada en Santander corresponde a Barichara, en vista de que más del 90% de sus construcciones se realizaron con esta

técnica constructiva [19]. De esa manera se promueve la arquitectura sostenible, artesanal y natural. Sin embargo, el potencial de material para la técnica se extiende por más municipios, Curití presenta un proceso de desarrollo de vivienda campestre por lo que cuenta con valores bajos de suelo con respecto a otros municipios.

Adicionalmente, tiene una actividad inmobiliaria constante [19] debido a que se están estableciendo centros turísticos y posee una posición geográfica estratégica aledaña a otros atractivos turísticos de Santander, como el municipio de San Gil.

Por otro lado, Piedecuesta resalta la importancia del papel de los maestros artesanos en su economía local. Considerando la relevancia que tienen en las formas declaradas como patrimonio [20]. El municipio se ha caracterizado por la implementación de la tierra en construcciones representativas como el palacio municipal [13]. En el siglo XVIII, las riquezas que se obtenían en los campos eran invertidas en las construcciones de casas a través de la técnica constructiva de la tierra apisonada o tapia pisada [20] que se destacaba por ser la arquitectura neogranadina. El municipio en la actualidad conserva algunas de estas construcciones que promueven la tradición y cultura.

#### ***2.1.4 Ensayos de caracterización del suelo en el laboratorio***

**2.1.4.1 INV-E 123 Granulometría: Determinación del tamaño de partículas.** Mediante el presente ensayo de laboratorio se hace posible la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas presentes en el suelo. Es necesario realizar la preparación de la muestra según lo establece la INV E-106.

Ahora bien, la normativa plantea dos métodos mediante los cuales se puede determinar la distribución de las partículas. El primero hace referencia a el análisis granulométrico de la fracción de suelo que pasa por el Tamiz No 10. Este procedimiento se realiza mediante un hidrómetro. Se prepara

1 litro de líquido, compuesto por agua y agente dispersante en el cilindro de sedimentación y se le adiciona la muestra de suelo. A partir de esto se determina la velocidad de decantación de las partículas dispuestas en el agua, en función de la variación de la densidad de la solución, calculando sus proporciones en la muestra [14].

El segundo método hace referencia al análisis por Tamizado, el cual se basa en la implementación de un juego de tamices a través del cual se hace pasar la muestra, analizando cada fracción retenida por cada tamiz. Los resultados obtenidos del proceso se registran en una ficha de recolección estandarizada por la normativa.

La información anterior permite calcular la cantidad de gravas (100-% pasa N°4), Finos (% retenido N° 200) y arenas (100- gravas-finos) presentes en la muestra. Adicionalmente, mediante los porcentajes retenidos por cada tamiz se realiza la curva de distribución granulométrica.

**2.1.4.2 Ensayo de límite líquido, plástico e índice de plasticidad (INV E -125 & INV E-126).** Los límites de Attemberg, hacen referencia al límite líquido y el límite plástico, estos parámetros intervienen en varios procesos de clasificación de suelos. Son importantes para su caracterización. Adicionalmente, estos parámetros intervienen para establecer correlaciones sobre el comportamiento ingenieril de los suelos (compresibilidad, compactibilidad, permeabilidad, etc.)

Para la realización del ensayo es necesario preparar la muestra, la cual debe contar con aproximadamente 200 gr que pasen por el tamiz No 40.

La INV E-125 establece el procedimiento para la determinación del límite líquido, el cual se realiza mediante la implementación de la cazuela de Casa Grande donde se dispone una porción de la muestra humedecida en toda el área de la cazuela, para después dividirla en dos partes con un ranurador, donde el espesor de la abertura debe ser de aproximadamente 1 cm. Ahora bien, se aplican una serie de golpes por caída repetitiva con el objeto de que las dos partes fluyan hasta cerrar la

abertura. Se debe registrar el número de golpes al cual se cierra por completo la división entre las partes.

Finalmente, mediante el contenido de humedad y el número de golpes es posible hacer el cálculo del límite líquido de la muestra.

Por otro lado, la INV E-126 establece el proceso para la determinación del límite plástico de un suelo. El cual consiste en presionar de manera repetitiva una porción de suelo húmeda, formando rollos de 1/8" de diámetro aproximadamente hasta que el contenido de agua se reduzca a tal punto que se produzca un agrietamiento o el rollo se desmorone. Por lo tanto, el límite plástico corresponde a la humedad que mínima que puede tener la muestra para poder formar el rollo del diámetro establecido sin que este se rompa.

Final mente el índice de plasticidad hace referencia a la diferencia entre el límite líquido y plástico. Este parámetro indica el intervalo de variación del contenido de humedad con el cual el suelo se mantiene plástico [21].

#### **2.4.1.3 INV E -181. Sistema de clasificación de suelos para propósitos de la ingeniería.**

Esta normativa define el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), mediante el cual se clasifican los suelos a partir de su distribución de los tamaños de sus partículas y los límites líquido, plástico e índice de plasticidad.

El método establece criterios de asignación de símbolos y nombres de los grupos a partir de los resultados de las pruebas de laboratorio, los cuales se basan en dos letras. Donde la primera hace referencia al componente principal de la tierra (grava, Arena, etc.) y la segunda hace referencia a la curva granulométrica o la carta de plasticidad en caso de que sean finos. El sistema de clasificación SUCS se encuentra estandarizado en la normativa ASTM D 2487-93

**2.4.1.4 Ensayo modificado de compactación: Relaciones de humedad y peso unitario seco INV E -142.** El presente ensayo de laboratorio se utiliza para determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco de los suelos. Así mismo, permite determinar la cantidad de agua óptima del suelo de manera que se genere un mejor movimiento entre partículas, dando como resultado una buena compactación según la energía empleada con el fin de la mejor resistencia del suelo.

Para la realización del ensayo se toma una muestra del suelo con una humedad modelo seleccionada, la cual se coloca en un molde en capas, sometiendo cada capa entre 25 y 56 golpes con un martillo de 44.48 N, desde una altura de aproximadamente 18". Seguido de esto se determina el peso unitario resultante.

El proceso se repite con diferentes unidades modelo para establecer una curva de compactación. Esta curva relaciona las humedades utilizadas con los pesos unitarios secos resultantes de cada una.

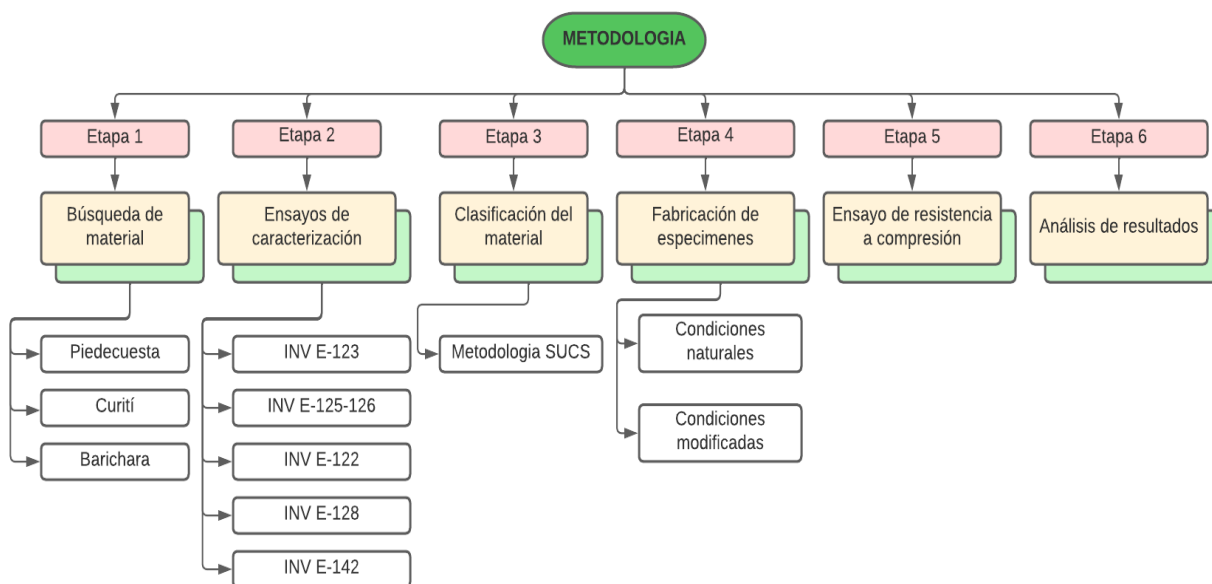
Finalmente, el vértice de la curva de compactación hace referencia a el valor de humedad óptimo para la compactación del suelo y su peso unitario máximo seco.

**2.1.4.5 INV E-152 Ensayo de compresión simple.** El presente ensayo de laboratorio permite determinar la resistencia máxima a la compresión de los suelos mediante la aplicación de una carga axial con control de deformación. Adicionalmente, permite determinar la relación esfuerzo deformación del material.

Ahora bien, para la realización de este ensayo, se pone el espécimen en el aparato de carga centrado. Seguidamente, se aplica una carga que ocasione una deformación axial hasta que el espécimen falle. Es necesario registrar los valores de resistencia, esfuerzo y deformación obtenidos. De la misma manera, se debe realizar un esquema o una fotografía de las condiciones de falla del material, donde se evidencie en ángulo de inclinación de la superficie de rotura si dicho ángulo es medible.

### 3. Método

Figura 1. Diagrama de metodología



El desarrollo de la investigación se llevó a cabo mediante 6 etapas que permitieron el cumplimiento de los objetivos.

#### 3.1 Etapa 1: Búsqueda del material

Para el desarrollo de la investigación se tendrá en cuenta material proveniente de tres municipios de Santander. material, deberá contar con semejanza en relación con las características del suelo implementado en las construcciones de tapia por lo cual, el aspecto más relevante es la presencia significativa de finos en su composición. La extracción es planeada a cielo abierto generando condiciones adecuadas de transporte y conservación de muestras representativas que permitan el desarrollo de los respectivos ensayos de laboratorio.

### **3.2 Etapa 2: Caracterización del material**

La caracterización de las diferentes muestras se llevará a cabo mediante ensayos de laboratorios basados en la normativa del INVIAS.

En primer lugar, se realizará el ensayo de determinación del tamaño de las partículas estipulado en la INV E-123. Con el objeto de evidenciar la distribución de partículas que componen la muestra y establecer los porcentajes de gravas, arenas y finos. Seguidamente, se determinarán los límite líquido y límite plástico (INV E-125 -126) que permiten analizar el comportamiento del suelo con contenido de humedad.

Por otro lado, se hallará el contenido de humedad natural de las muestras de suelo analizados aplicando la normativa INV E-122. De la misma forma, el valor de la gravedad específica descrita en la INV E -128 a partir de la relación que existe entre el volumen de un sólido y la masa del mismo volumen de agua destilada y libre de vacíos.

Finalmente, se procederá a realizar el ensayo de Proctor modificado siguiendo el procedimiento establecido en la INV E -142 con el objeto de determinar la energía de compactación y el porcentaje de humedad óptimo de manera que se generen las mejores condiciones en el material de modo que entre las partículas exista la cohesión óptima para la fabricación de los especímenes para el ensayo de resistencia a compresión de las muestras.

### **3.3 Etapa 3: Clasificación del material**

La metodología implementada para la clasificación de las muestras de suelo de cada uno de los municipios será el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) Basado en los resultados obtenidos de la determinación del tamaño de las partículas (INV E-123) y los límites líquidos (INVE -125-126).

### 3.4 Etapa 4: Fabricación de especímenes

La fabricación de los especímenes se implementará un molde de bronce con capacidad de tres especímenes en forma de cubo de 5 cm X 5 cm X 5cm. Lo anterior, basado en lo que establece la normativa peruana E-80, donde los especímenes para ensayos de compresión en la Tapia pisada se realizan en forma de cubos de 10 cm X 10 cm X 10 cm. Sin embargo, para el desarrollo del presente trabajo se utilizará un tamaño menor de los mismos.

Ahora bien, se realizarán tres especímenes para las muestras de suelo natural con su granulometría inicial, retirando únicamente las partículas de suelo muy grandes que no permitían la compactación en los moldes. Para la elaboración de los cubos se tendrá en cuenta la energía de compactación y los porcentajes de humedad óptimos para las muestras de cada municipio obtenidos en el ensayo de Proctor modificado.

Por otro lado, se procederá a realizar la modificación del suelo natural, esto con el objetivo de analizar la influencia de la granulometría presente en la muestra en la resistencia a compresión de los especímenes. Esto, a través de la siguiente serie de tamices, con el fin de buscar un material de construcción homogéneo y manejable:

N° 10

N° 20

N° 40

N° 60

N° 140

N° 200

1. La primera modificación que consiste en retirar material grueso de la muestra y trabajar con el material más fino. Por lo tanto, se despreció el material retenido por el tamiz N° 10 y N°20.

2. La segunda modificación desprecia el material retenido en los tres primeros tamices (N° 10, N° 20 y N° 40)

3. La tercera y cuarta modificación consiste en retirar material más fino para analizar el comportamiento del material grueso en la tapia. Por lo cual, se despreció el material retenido en primera medida en los dos últimos tamices N° 200 y N° 140. Y finalmente, la última modificación se desprecia los porcentajes de suelo retenidos en los tres últimos tamices (N° 200, N° 140 y N°60).

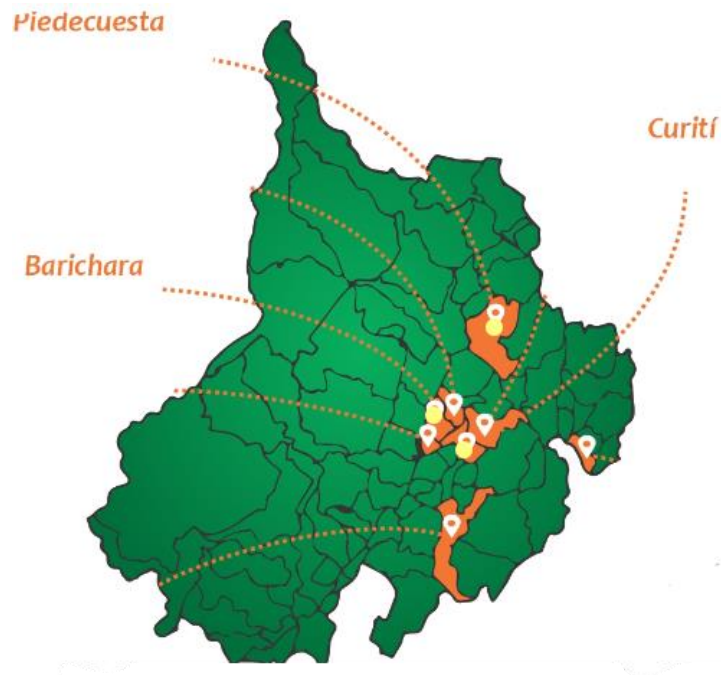
### **3.5 Etapa 5: Ensayo de resistencia a la compresión**

El ensayo tenía como objeto brindar un punto de comparación entre el comportamiento a compresión de diferentes dosificaciones. Para lo cual, se tomó como referencia normativa la E-80 que define los ensayos de laboratorio para medir la resistencia del material en tierra a compresión, utilizando los materiales establecidos por la ASTM C 109 para el ensayo a compresión de probetas cubicas de 50 mm de mortero de cemento hidráulico, como mordazas y moldes. Donde se coloca el espécimen en marco de ensayo aplicando cargas en sus caras manteniendo la velocidad mientras el cubo está fluyendo antes de la falla.

## 4. Resultados

### 4.1 Etapa 1: Búsqueda del material

**Figura 2.** *Municipios analizados*



Adaptado de [22].

Para la selección del material de la investigación se tuvieron en cuenta tres municipios de Santander. En primer lugar, Barichara, el cual se caracteriza por ser un municipio representativo en la construcción en tapia pisada por contar con un material arcilloso en mayor medida, la muestra representativa de este municipio se obtuvo a través de trabajadores locales que proveyeron el material y lo enviaron al AMB. De la misma manera se optó por el municipio de Curití, ya que los suelos presentes en este municipio cuentan con porcentajes representativos de finos y al igual que

en Barichara la muestra representativa fue de 100 kg obtenida a través de trabajadores que emplean este material en la zona.

Finalmente, la tercera muestra se obtuvo del municipio de Piedecuesta, a través de una gestión con la ejecución Obra del Intercambiador de Guatiguara. Debido a que, a través de informes publicados en el SECOP del avance de la obra, se encontró que el suelo presente en la zona se clasificaba como arena- arcillosa (SC)

Las muestras fueron transportadas hasta la universidad Santo Tomás Campus Piedecuesta y almacenadas en el laboratorio de ingeniería.

**Figura 3.** *Muestras de suelo de Piedecuesta, Curití y Barichara*



El suelo obtenido del municipio de Barichara tuvo el color rojizo, lo cual indica la presencia significativa de hierro en la composición del material. De la misma manera, La muestra proveniente del municipio de Curití se caracterizó por contar con un color amarillento/ Naranja, lo cual también indicaba la presencia de hierro y finalmente la muestra de Piedecuesta tenía un aspecto más amarillo grisáceo, lo que evidencia que este material es sedimentario puzolánico, producto de la degradación del mismo material.

## 4.2 Etapa 2: Ensayos de caracterización

### 4.2.1 Determinación del tamaño de partículas INV E-123

Para el ensayo granulométría, inicialmente se tomó una muestra de cada suelo y se aplicó un proceso de secado. Con el material seco, se tomaron 500 gr de cada una para realizar un proceso de lavado sobre el tamiz N° 200, con el objeto de eliminar la fracción fina presente en el material.

**Figura 4.** *Proceso de Lavado de las muestras*



Después del proceso de lavado se procedió a secar las muestras, y se registró su peso seco. Para la realización de la granulométría se implementó una serie de seis tamices (N° 10, N° 20, N° 40, N° 60, N° 140 y N° 200). A partir del cual se realizó el proceso de tamizado mediante una tamizadora mecánica.

**Figura 5.** *Proceso de tamizado de las muestras*

Los resultados obtenidos para cada tipo de suelo implementado se exponen a continuación:

**Tabla 1.** *Granulometría de la muestra de Piedecuesta*

		<b>Peso inicial (gr)</b>		<b>455</b>
		<b>Peso #200 (gr)</b>		<b>312</b>
<b>Tamiz</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Peso retenido</b>	<b>% Retenido</b>	<b>%Pasa</b>
3/4"	19,1	0	0	100
3/8"	9,525	0	0	100
N.4	4,75	0	0	100
N.10	2	38	8,35164835	91,6483517
N.20	0,84	87	19,1208791	72,5274725
N.40	0,42	84	18,4615385	54,0659341
N.60	0,25	49	10,7692308	43,2967033
N.140	0,106	46	10,1098901	33,1868132
N.200	0,075	7	1,53846154	31,64983517
<b>Fondo</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>31,6483517</b>

**Tabla 2.** *Granulometría de la muestra de Curití*

<b>Peso inicial (gr)</b>					<b>425</b>
<b>Peso #200 (gr)</b>					<b>252</b>
<b>Tamiz</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Peso retenido</b>	<b>% Retenido</b>	<b>%Pasa</b>	
3/4"	19,1	0	0	100	
3/8"	9,525	17	4	96	
N.4	4,75	5	1,17647059	94,8235294	
N.10	2	12	2,82352941	92	
N.20	0,84	12	2,82352941	89,1764706	
N.40	0,42	10	2,35294118	86,8235294	
N.60	0,25	17	4	82,8235294	
N.140	0,106	160	37,6470588	45,1764706	
N.200	0,075	18	4,23529412	40,9411765	
Fondo	0	1	0,23529412	40,7058824	

**Tabla 3.** *Granulometría de la muestra de Barichara*

<b>Peso inicial (gr)</b>					<b>500</b>
<b>Peso #200 (gr)</b>					<b>125</b>
<b>Tamiz</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Peso retenido</b>	<b>% Retenido</b>	<b>%Pasa</b>	
3/4"	19,1	0	0	100	
3/8"	9,525	0	0	100	
N.4	4,75	0	0	100	
N.10	2	9	1,8	98,2	
N.20	0,84	5	1	97,2	
N.40	0,42	3	0,6	96,6	
N.60	0,25	3	0,6	96	
N.140	0,106	72	14,4	81,6	
N.200	0,075	32	6,4	75,2	
Fondo	0	1	0,2	75	

**Tabla 4.** *Resultado de la Granulometría para las tres muestras*

<b>Datos</b>	<b>Piedecuesta</b>	<b>Curití</b>	<b>Barichara</b>
Gravas (%)	0	5,17	0
Arenas (%)	66,59	53,88	24,8
Arcillas (%)	32,59	40,94	75,2

#### 4.2.2 Determinación de limite líquido

Para la determinación de los límites líquidos se contó con 200 gr de muestra seca refinados a través del tamiz N° 40. A los cuales se les adiciono diferentes porcentajes de agua hasta lograr una mezcla uniforme que se extendió sobre la cazuela de Casa Grande. La mezcla se realizó con ayuda de una espátula pequeña, la misma sirvió como herramienta para disponer la mezcla en la cazuela de manera uniforme y sin darle muchas pasadas con la espátula de manera que el material no pierda humedad. Seguidamente se realizó una ranura en medio de la cazuela y se aplicaron una serie de golpes hasta que la ranura cerrara 1 cm. Después de cerrada la ranura se tomó una muestra y se registró su peso, a continuación, la muestra se puso a secar y se registró su peso seco.

El ensayo buscaba más humedades para las cuales la ranura realizada se cerrará en los siguientes rangos de golpes aplicados: 15-25, 20-30, 25-35.

**Figura 6.** Equipo LL y LP



**Figura 7.** Límites de las muestras de suelo de Piedecuesta, Curití y Barichara respectivamente



**Tabla 5.** *Resultados de los límites líquidos*

Límites líquidos		
Piedecuesta	Curití	Barichara
22,74%	39,75%	40,25 %

#### 4.2.3 Determinación del límite plástico

Para la determinación del límite plástico de cada muestra se adicionó agua a una muestra de suelo seco que pasó por el tamiz N° 40 y se realizaron rollos de 3 mm de diámetro aproximadamente hasta que el material se agrietara. Se tomaron dos muestras, cada una de 6 gr.

**Figura 8.** *Muestras de Límite plástico***Tabla 6.** *Resultados del límite plástico*

Límites plásticos		
Piedecuesta	Curití	Barichara
19,39%	24,74%	21,92%

#### 4.2.4 Ensayo de determinación del contenido de humedad en las muestras

Se determinó el contenido de humedad tomando una porción de la muestra y sometiendo a un proceso de secado de modo que perdiera la humedad.

**Tabla 7.** Resultados del ensayo de *determinación de humedad*

	Curití	Barichara	Piedecuesta
Wr+Wh (g)	5226	413,23	8594
Wr+Ws (g)	4636	387	8003
Wr (g)	467	131,14	494
W (%)	14,15%	10,25%	7,87%

#### 4.2.5 Ensayo de *determinación de Gravedad específica*

Para la realización del ensayo se implementó el método B establecido en la normativa INV E-128 el cual corresponde a el procedimiento para muestras secas a 20° C.

**Figura 9.** Ensayo de *gravedad específica Piedecuesta***Figura 10.** Muestras de ensayo de *gravedad específica Curití y Barichara*

**Tabla 8.** Resultados de ensayo de gravedad específica de las muestras

	<b>Piedecuesta</b>	<b>Curití</b>	<b>Barichara</b>
<b>Mp (g)</b>	165,29	165,29	165,29
<b>MpW (g)</b>	658,77	658,77	658,77
<b>S (g)</b>	80	80	80
<b>MpWs (g)</b>	707,27	707,83	709,1
<b>T (°C)</b>	25	25	25
<b>p (g/Cm<sup>3</sup>)</b>	0,99705	0,99705	0,99705
<b>V (Cm<sup>3</sup>)</b>	494,94	494,94	494,94
<b>Mpw, T (g)</b>	658,77	658,77	658,77
<b>Gt</b>	2,54	2,586	2,696
<b>Gt (20 °C)</b>	<b>2,537</b>	<b>2,583</b>	<b>2,693</b>

#### 4.2.6 Ensayo de Proctor modificado

Para el desarrollo de este ensayo se optó por el método A. establecido en la normativa del INVIAS-142 implementando un molde de 15.2 cm de diámetro y 12.1 cm de altura y un martillo de Proctor de 44.48 N. La muestra se dispuso en el molde mediante cinco capas, compactadas por 56 golpes. El procedimiento se realizó para cuatro puntos de humedades diferentes, de modo que se pudiera determinar la humedad óptima y la densidad máxima de compactación de los materiales.

Ahora bien, se tomó una muestra de 20 kg por cada tipo de suelo, la cual paso por un proceso de secado con el objeto de quitar la humedad natural presente y manejar humedades teóricas completas. Para el suelo proveniente de Piedecuesta se tomaron humedades de 4%, 6%, 8% y 10%. Para esto, el material se dispuso en una bandeja y se mezcló con el agua hasta que la mezcla se tuviera una apariencia uniforme y se procedió a la compactación. Seguidamente se procedió a retirar el anillo superior del molde y enrazar y se registró el valor de la muestra más el molde.

Posteriormente, se tomó una muestra y se registró su peso húmedo, se sometió a un proceso de secado durante un día y se registró su peso seco. Lo anterior con el objeto de obtener las

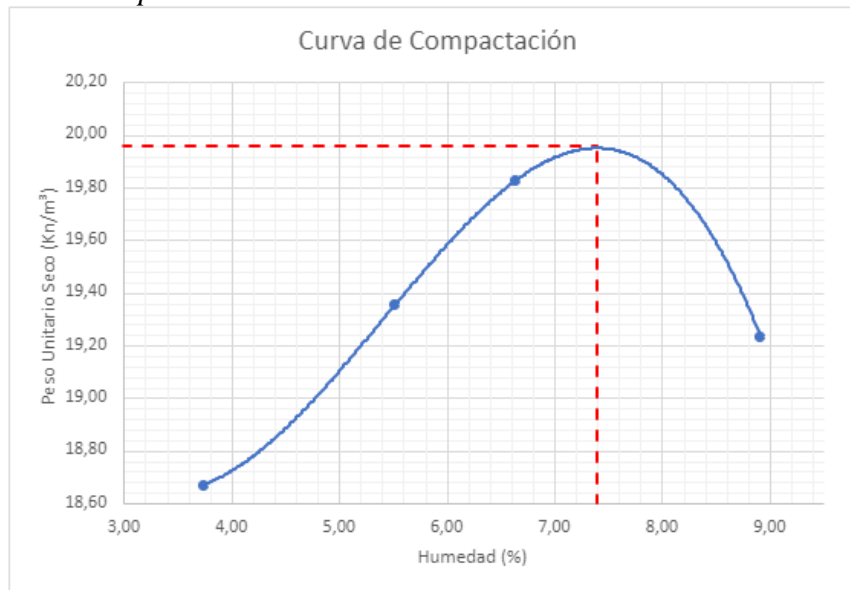
humedades reales con las que se realizaron los respectivos ensayos.

**Figura 11.** *Ensayo de Proctor modificado: Muestra de Piedecuesta*



**Tabla 9.** *Resultados Proctor modificado Piedecuesta*

	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>	<b>Muestra 4</b>
<b>Humedad Deseada (%)</b>	4	6	8	10
<b>D molde (cm)</b>	15,2	15,2	15,2	15,2
<b>H molde (cm)</b>	12,1	12,1	12,1	12,1
<b>V molde (cm<sup>3</sup>)</b>	2195,65	2195,65	2195,65	2195,65
<b>Wmolde (g)</b>	5636	5636	5636	5636
<b>Wr+MCh (g)</b>	9973	10209	10370	10326
<b>Wr (g)</b>	8	9	9	7
<b>Wr+Mh (g)</b>	68,4	60	44	76
<b>Wr+Ms (g)</b>	66,22	57,33	41,82	70,35
<b>Humedad Real (%)</b>	3,74	5,52	6,64	8,92
<b>Densidad Húmeda (Kn/m<sup>3</sup>)</b>	1,98	2,08	2,16	2,14
<b>Densidad Seca (Kn/m<sup>3</sup>)</b>	1,9	1,97	2,02	1,96
<b>Peso Unitario Seco (Kn/m<sup>3</sup>)</b>	18,67	19,36	19,83	19,23

**Figura 12.** Curva de compactación Piedecuesta

*Nota.* El gráfico anterior evidencia que para la muestra del municipio de Piedecuesta la humedad óptima corresponde a 7.4 % y el peso unitario seco máximo es de 19.96 Kn/ m3.

Para la muestra de suelo del municipio de Curití se manejaron humedades de 6%, 8%, 10% y 12%

**Figura 13.** Ensayo de Proctor modificado: Curití

**Tabla 10.** *Resultados de Proctor Curití*

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
<b>Humedad Deseada (%)</b>	6	8	10	12
<b>D molde (cm)</b>	15,2	15,2	15,2	15,2
<b>H molde (cm)</b>	12,1	12,1	12,1	12,1
<b>V molde (cm<sup>3</sup>)</b>	2195,65	2195,65	2195,65	2195,65
<b>Wmolde (g)</b>	5636	5636	5636	5636
<b>Wr+MCh (g)</b>	9874	10227	10333	10088
<b>Wr (g)</b>	8	8	112	60
<b>Wr+Mh (g)</b>	67	65	374	358
<b>Wr+Ms (g)</b>	63,13	60,5	350,46	318,51
<b>Humedad Real (%)</b>	7,02	8,57	9,87	15,28
<b>Densidad Húmeda (Kn/m<sup>3</sup>)</b>	1,93	2,09	2,14	2,03
<b>Densidad Seca (Kn/m<sup>3</sup>)</b>	1,8	1,93	1,95	1,76
<b>Peso Unitario Seco (Kn/m<sup>3</sup>)</b>	17,69	18,89	19,09	17,25

**Figura 14.** *Curva de compactación Curití*

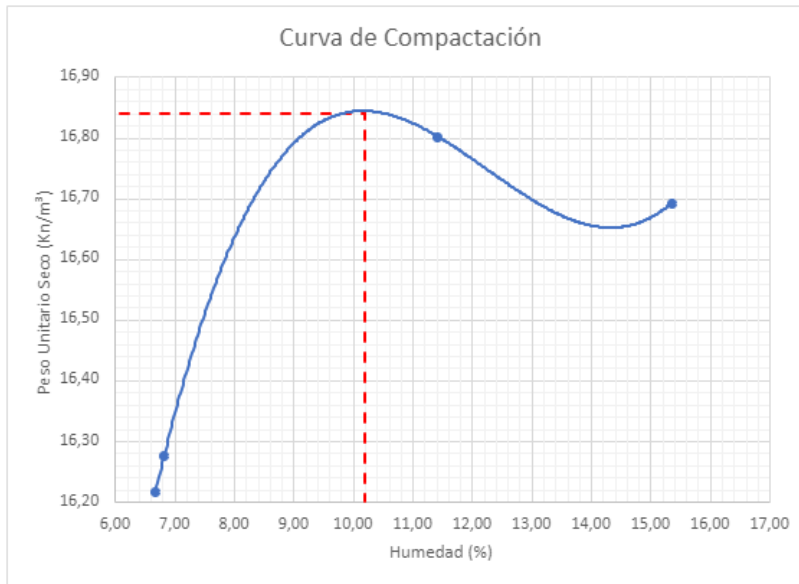
*Nota.* La figura 13 evidencia los resultados del ensayo para la muestra obtenida del municipio de Curití. Donde la humedad óptima corresponde a 9.8% y el peso unitario máximo 19.10 Kn/m<sup>3</sup>.

Finalmente, a la muestra de Barichara se le aplicaron humedades de 4%, 6%, 8% y 10%

**Figura 15.** *Ensayo de Proctor: Barichara***Tabla 11.** *Resultados del Proctor Barichara*

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
<b>Humedad Deseada (%)</b>	6	10	12	14
<b>D molde (cm)</b>	9,9	9,9	9,9	9,9
<b>H molde (cm)</b>	11,65	11,65	11,65	11,65
<b>V molde (cm<sup>3</sup>)</b>	896,78	896,78	896,78	896,78
<b>Wmolde (g)</b>	3814	3814	3814	3814
<b>Wr+MCh (g)</b>	5396	5404	5526	5575
<b>Wr (g)</b>	8,4	8,57	8,43	6,37
<b>Wr+Mh (g)</b>	42,08	29,22	31,74	37,53
<b>Wr+Ms (g)</b>	39,97	27,9	29,35	33,38
<b>Humedad Real (%)</b>	6,68	6,83	11,42	15,36
<b>Densidad Húmeda (Kn/m<sup>3</sup>)</b>	1,76	1,77	1,91	1,96
<b>Densidad Seca (Kn/m<sup>3</sup>)</b>	1,65	1,66	1,71	1,7
<b>Peso Unitario Seco (Kn/m<sup>3</sup>)</b>	16,22	16,28	16,8	16,69

**Figura 16.** Curva de compactación Barichara



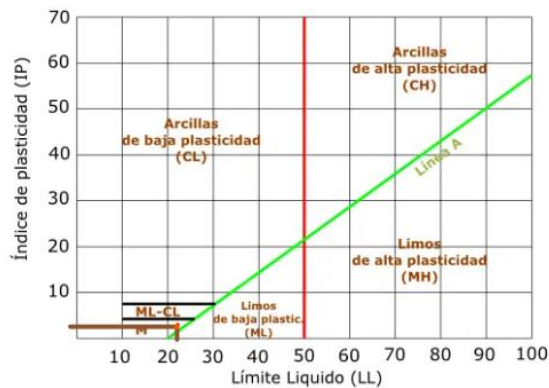
Nota. La curva de compactación de la muestra de Barichara evidencia que la humedad óptima para la misma corresponde a 10.2% con un peso unitario máximo de 16.84 Kn/m<sup>3</sup>.

### 4.3 Etapa 3: Clasificación de las muestras

#### 4.3.1 Piedecuesta

Mas del 50% del material pasa por el tamiz N° 4 y su contenido de finos supera el 12%

**Figura 17.** Carta de Casa Grande: Muestra Piedecuesta

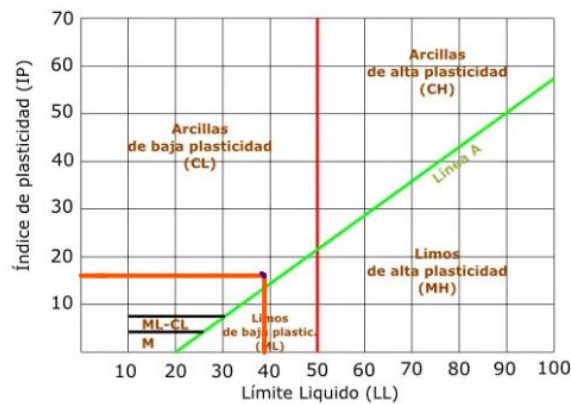


*Nota:* La carta de casa grande permite evidenciar que la muestra obtenida del municipio de Piedecuesta se clasifica como una Arena Limosa (SM).

**4.3.2 Curití**

Mas del 50% del material pasa por el tamiz N° 4 y su contenido de finos supera el 12%

**Figura 18.**Carta de Casa Grande: Muestra Curití

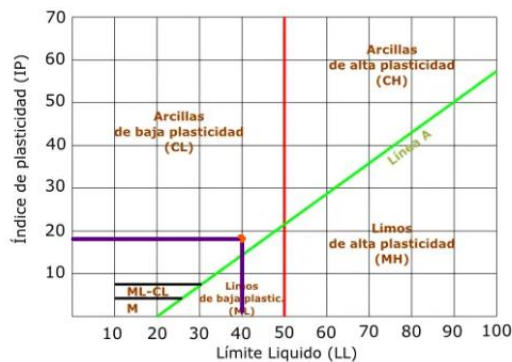


*Nota:* La carta de casa grande permite evidenciar que la muestra obtenida del municipio de Curití se clasifica como una Arena arcillosa (SC).

**4.3.4 Barichara**

Mas del 50% del material pasa por el tamiz N° 4 y su contenido de finos supera el 12%

**Figura 19.**Carta de Casa Grande: Muestra Barichara



*Nota:* La carta de casa grande permite evidenciar que la muestra obtenida del municipio de Barichara se clasifica como una arcilla de baja plasticidad (CL).

#### 4.4 Etapa 4: Fabricación de especímenes

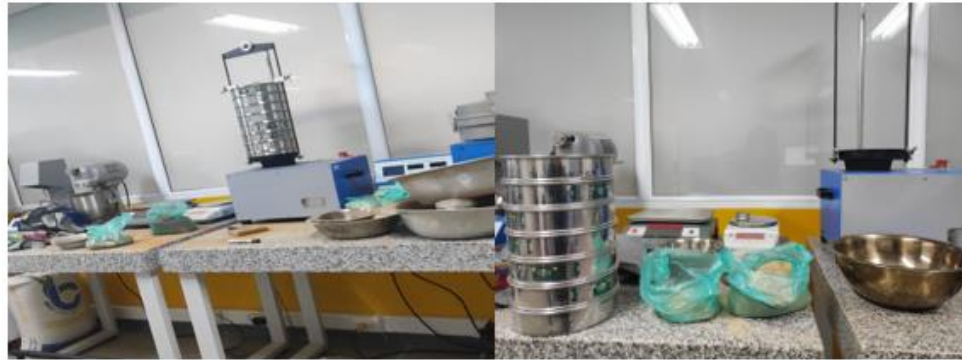
La fabricación se llevó a cabo a partir de las condiciones del suelo natural retirando la materia orgánica y las partículas de gran tamaño teniendo en cuenta los resultados de la humedad óptima del Proctor modificado.

Ahora bien, con el objeto de analizar el comportamiento portante del material se realizaron modificaciones a su composición granulométrica según lo establecido en la metodología, para estos especímenes se realizaron pruebas de humedad de campo. Después de realizar y desencofrar los especímenes se envolvieron el papel vinipel para conservar la humedad durante el proceso de curado de 28 días.

**Figura 20.** *Proceso de elaboración de los especímenes*



**Figura 21.** *Proceso de modificación de la composición granulométrica*



**Figura 22.** *Modificación del suelo de Piedecuesta y Curití, finos y gruesos*



**Figura 23.** *Modificación del suelo de Barichara, finos y gruesos*



A continuación, se evidencian los especímenes realizados para cada uno de los tipos de suelo y las variaciones de las composiciones.

**Figura 24.** *Especímenes del suelo del municipio de Curití*



**Figura 25.** *Especímenes en Perfil de Curití*



**Figura 26.** *Especímenes de las muestras de suelo Barichara*



**Figura 27.** *Especímenes perfil suelo de Barichara*



**Figura 28.** *Especímenes de suelo de Piedecuesta*



**Figura 29.** *Especímenes perfil suelo de Piedecuesta*



**Figura 30.** Periodo de Curado de 28 días de cada espécimen

Una vez cumplido el tiempo de curado de los especímenes se realizó el ensayo a compresión utilizando el marco universal electromecánico de carga.

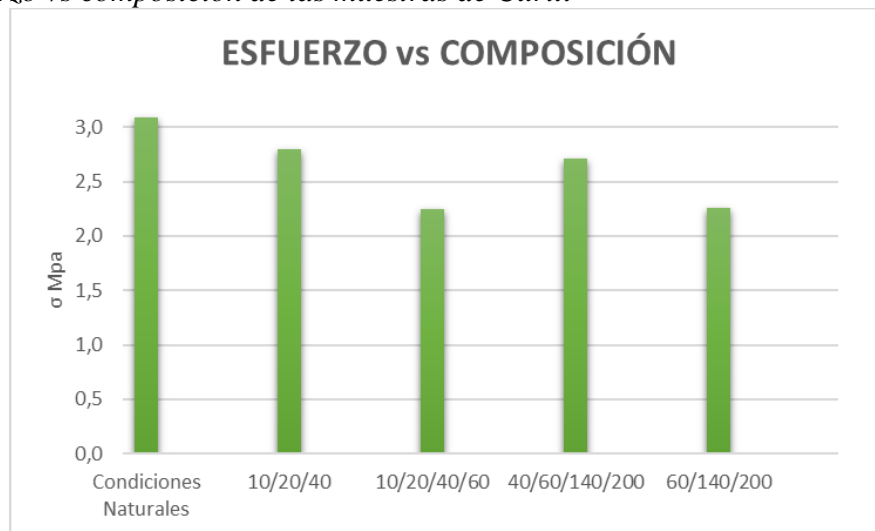
**Figura 31.** Ensayo de compresión inconfiada (INV E -152)

*Nota:* El quipo utilizado para el ensayo es el marco universal electromecánico de carga uniforme con capacidad de 50 KN Marca Controls, Modelo 70-T1182/T; 70-T1184/T y descripción equipo universal uniframe. Para el ensayo de compresión inconfiada se contó con parámetros de entrada una sensibilidad de 0.015 KN, una velocidad de ensayo de 20.80 mm/min y un límite de carga de 20 KN.

En el ensayo se obtuvieron los siguientes resultados:

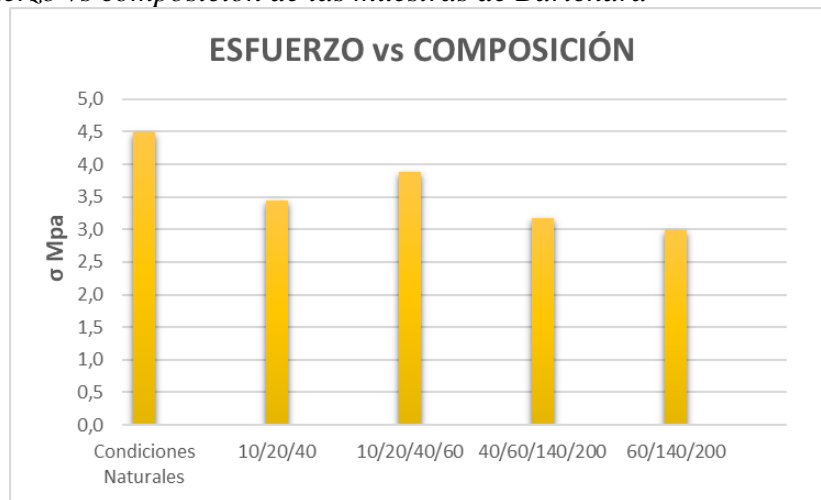
**Tabla 12.** Resultados de ensayo a compresión muestras de Curití

Composición	Condiciones Naturales	10/20/40	10/20/40/60	40/60/140/200	60/140/200
<b>Esfuerzo (Mpa)</b>	3,09	2,79	2,25	2,71	2,26
<b>Deformación unitaria</b>	0,152	0,153	0,161	0,146	0,163

**Figura 32.** Esfuerzo vs composición de las muestras de Curití**Tabla 13.** Resultados de ensayo a compresión Especímenes de Barichara

Composición	Condiciones Naturales	10/20/40	10/20/40/60	40/60/140/200	60/140/200
<b>Esfuerzo (Mpa)</b>	4,49	3,45	3,88	3,18	2,98
<b>Deformación unitaria</b>	0,18	0,15	0,19	0,17	0,21

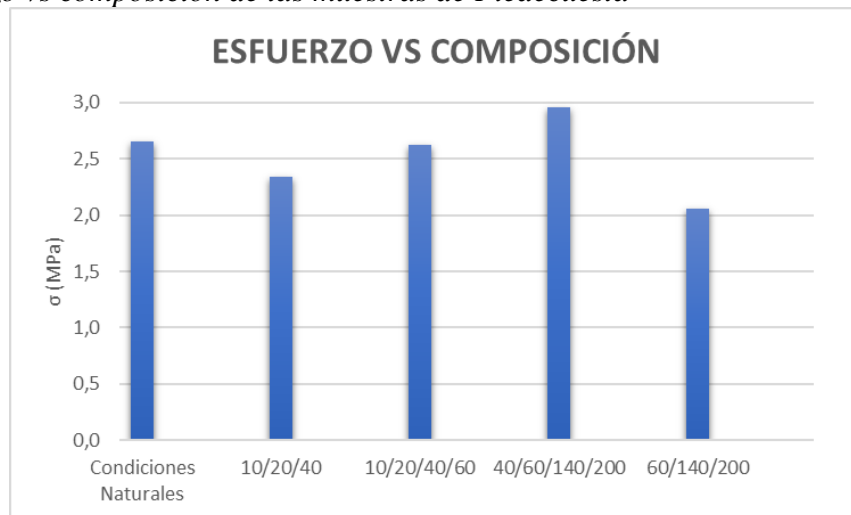
**Figura 33.** *Esfuerzo vs composición de las muestras de Barichara*



**Tabla 14.** *Resultados de ensayo a compresión de especímenes de Piedecuesta*

Composición	Condiciones Naturales	10/20/40	10/20/40/60	40/60/140/200	60/140/200
<b>Esfuerzo (Mpa)</b>	2,65	2,34	2,62	2,96	2,05
<b>Deformación unitaria</b>	0,14	0,13	0,15	0,14	0,15

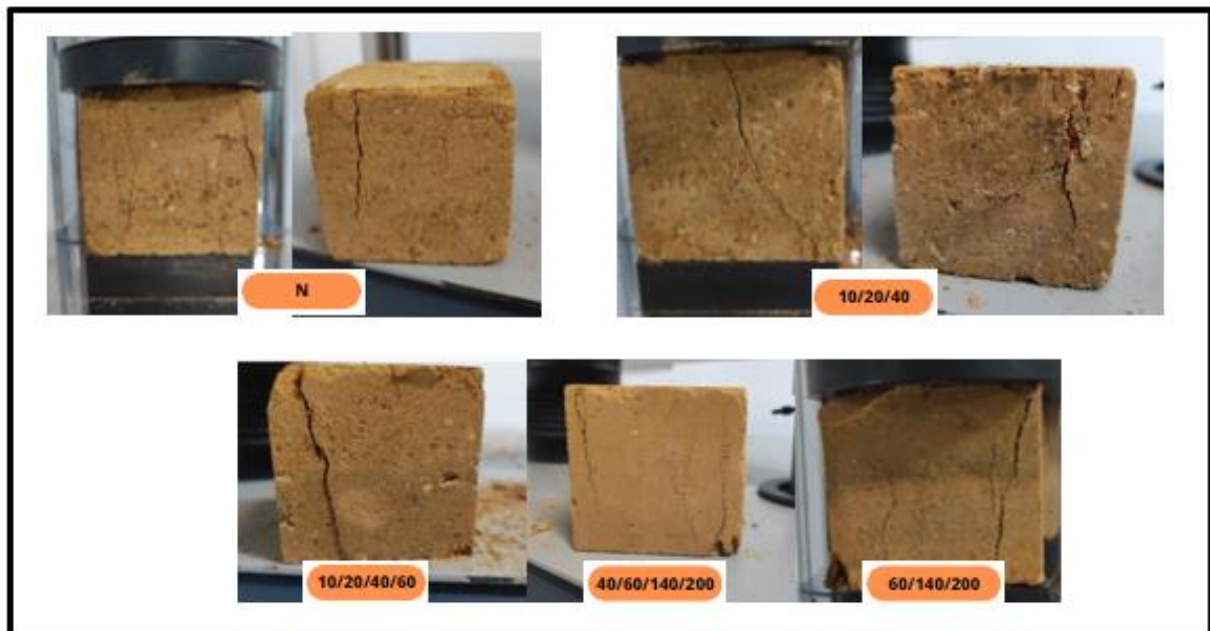
**Figura 34.** *Esfuerzo vs composición de las muestras de Piedecuesta*



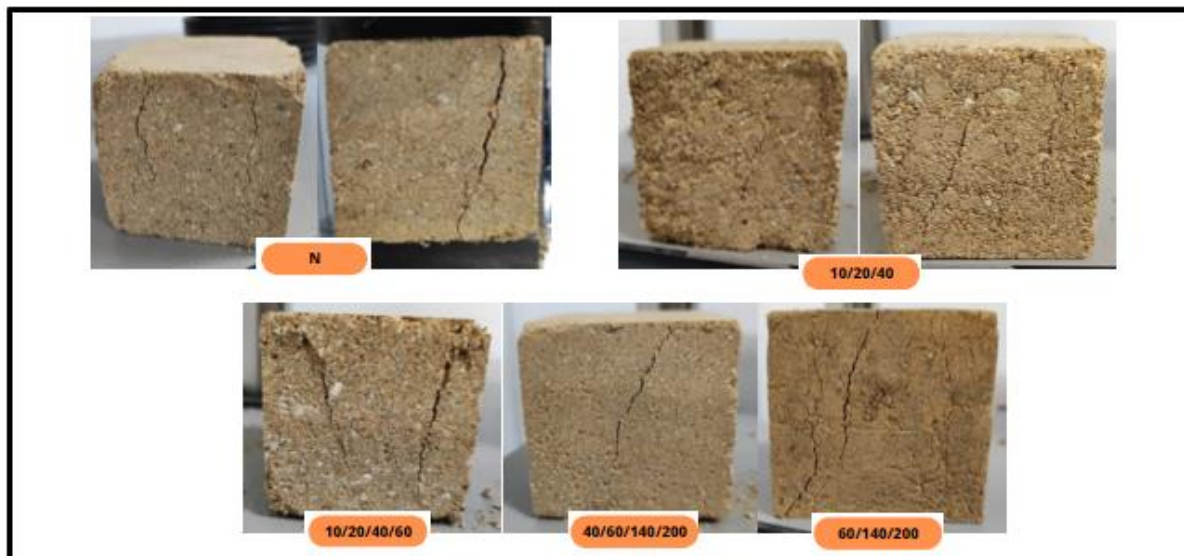
Los tipos de falla de los especímenes presentes durante la ejecución del ensayo para el suelo proveniente del municipio de Curití fueron principalmente tipo cono bien formado en ambos

extremos, esta clase de falla viene asociada al cortante. De la misma manera, en algunos especímenes se presentó una falla tipo cono-corte y corte neto. Con respecto a las fallas presentes en los especímenes del municipio de Piedecuesta, se pudo evidenciar que al ser este material más granular las fallas fueron mucho más definidas presentando fallas tipo cono y corte principalmente. Finalmente, los especímenes del municipio de Barichara contaban con mayor presencia de material fino arcilloso, por lo tanto, estos especímenes presentaron fallas de tipo columnar asociadas a los efectos de aplastamiento que primaban sobre las muestras.

**Figura 35.** *Modos de falla especímenes de Curití*



**Figura 36.** *Modos de falla de los especímenes del municipio de Piedecuesta*



**Figura 37.** *Modos de falla especímenes de Barichara*

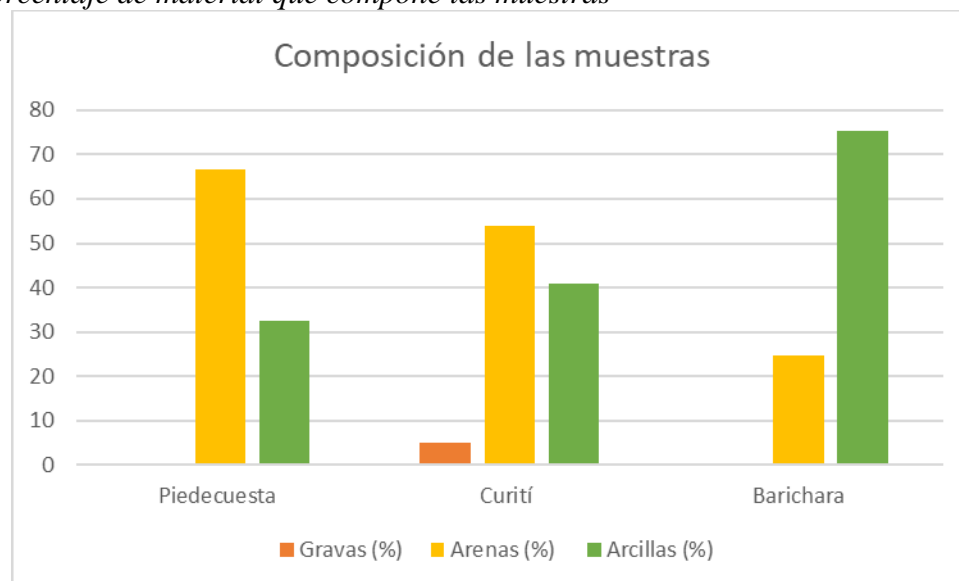


## 5. Análisis de resultados

### 5.1 análisis de la caracterización de los materiales

Por medio de los ensayos de laboratorio se pudo determinar que el material de la zona del municipio de Piedecuesta y Curití corresponden a una arena arcillosa (SC). Por otro lado, el material presente en el municipio de Barichara dio como resultado una arcilla inorgánica de baja plasticidad. Ahora bien, teniendo en cuenta que se tomó como referencia el manual del SENA para la construcción de muros de tapia y bareque, se evidencian que las granulometrías obtenidas para las muestras de los tres municipios se encuentran próximas a las recomendaciones establecidas por dicho manual. Siendo el material de Barichara, el que más se desfasa en relación con lo establecido con un porcentaje de finos considerable de un 75.2%.

**Figura 38.** Porcentaje de material que compone las muestras



**Tabla 15.** *Composición recomendada Manual del SENA*

<b>Composición</b>	
Gravilla	0-15%
Arena	40-50%
Limos	20-35%
Arcillas	15-25%

Adaptado de [15]

## 5.2 Análisis de dispersión del ensayo de compresión simple

Para la realización del ensayo se sometieron tres muestras por cada composición y tipo de material con el fin de establecer un esfuerzo promedio para cada composición de las muestras de los respectivos municipios.

De esa manera, para cada grupo de datos de carga se realizó el cálculo de la desviación estándar de modo que se pudiera evidenciar la dispersión entre los datos.

**Tabla 16.** *Desviación estándar de datos de carga entre cada espécimen por modificación*

<b>Item</b>	<b>Desviación estándar</b>
C natural	1,2168
C 10/20/40	1,0700
C 10/20/40/60	0,7297
C 40/60/140/200	0,3548
C 60/140/200	1,1725
B natural	1,1790
B 10/20/40	1,5801
B 10/20/40/60	1,6285
B 40/60/140/200	1,3639
B 60/140/200	0,3988
P natural	0,6160
P 10/20/40	0,2952
P 10/20/40/60	0,5391
P 40/60/140/200	1,4118
P 60/140/200	1,3772

**Figura 39.** Tendencia de desviaciones estándar entre las muestras analizadas

*Nota:* C, Muestras del municipio de Curití; B, Muestras de Barichara y P muestras Piedecuesta.

En la figura 39 se evidencia el comportamiento de la desviación estándar entre los especímenes. De aquí se puede inferir que la mayor dispersión entre los valores de carga máximo se encuentra en las modificaciones hechas al suelo de Barichara las cuales corresponden a las que contenían en su mayoría material más grueso, B 10/20/40 y B 10/20/40/60, siendo estas de 1,5 y 1,6 respectivamente. Por otro lado, la dispersión mínima referente a las muestras de este municipio correspondió a la modificación de material más fino B 60/140/200 con un valor de 0,39.

Ahora bien, analizando los resultados de desviación de las muestras del municipio de Curití se resalta que el valor máximo de dispersión correspondió a los especímenes de material más grueso C 10/20/40, siendo esta de 1,2 y el valor mínimo de dispersión se presentó en los especímenes compuestos con material fino C 40/60/140/200, con un valor de 0,35.

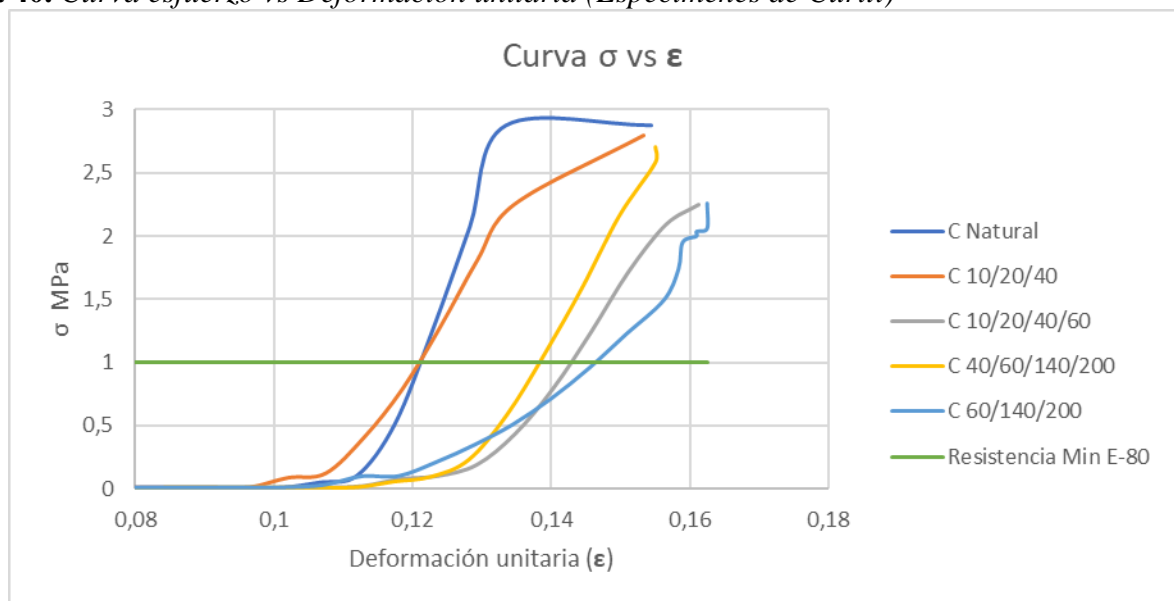
Finalmente, los especímenes del municipio de Piedecuesta fueron los que de manera general obtuvieron una menor dispersión de los datos. Estos especímenes en caso contrario a los

demás el valor mínimo correspondió a los de suelo más grueso P 10/20/40 siendo este de 0,2 y el máximo a los especímenes de material más grueso P 40/60/140/200, con un valor de 1,4.

### 5.3 Análisis de esfuerzo vs deformación unitaria

A partir de los valores de carga obtenidos en el ensayo de compresión simple regido por la INV E -152, se pudieron establecer los valores de esfuerzo último del material y la deformación unitaria. De modo que se pudiera observar el comportamiento del material en función de las variaciones de su composición entre material grueso y fino.

**Figura 40.** Curva esfuerzo vs Deformación unitaria (Especímenes de Curití)

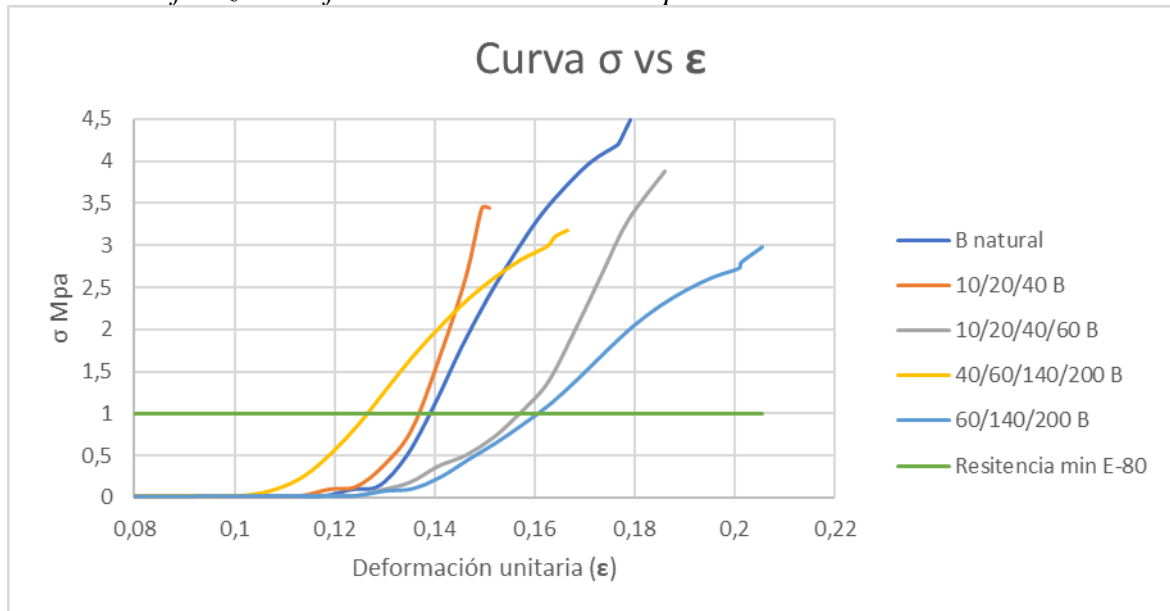


En la figura 40 se evidencia la comparación del comportamiento de los especímenes para el municipio de Curití. Donde el esfuerzo máximo correspondió a los especímenes en condiciones naturales, con un valor de 3.08 Mpa. Ahora bien, el esfuerzo disminuyó en relación con las demás modificaciones:

- C 10/20/40, produjo una disminución en el esfuerzo de 9.55 % en relación con el esfuerzo producto de las condiciones granulométricas naturales
- C 10/20/40/60, esta variación generó una disminución en el esfuerzo 21.40 %
- C 40/60/140/200, esta variación generó una disminución de 12.37 %
- C 60/140/200, esta variación presentó una disminución de 26.87 %

Para este tipo de suelo, se puede observar que todas las composiciones granulométricas cumplen con el esfuerzo mínimo establecido por la normativa E-80, el cual corresponde a 1 Mpa. Sin embargo, se evidencia que la composición natural presenta el comportamiento más óptimo en cuanto a resistencia a la compresión. A medida que se analiza el material con una composición más gruesa disminuye su capacidad, esto posiblemente debido a la disminución de cohesión entre las partículas, ya que, en condiciones naturales, la muestra presentaba una mejor cohesión.

Por otro lado, cuando se varió la composición refinando el material se observó que la resistencia también disminuyó. Lo anterior se presentó posiblemente debido que el material más fino por sí solo es muy moldeable y se deja deformar con facilidad.

**Figura 41.** Curva esfuerzo vs deformación unitario municipio de Barichara

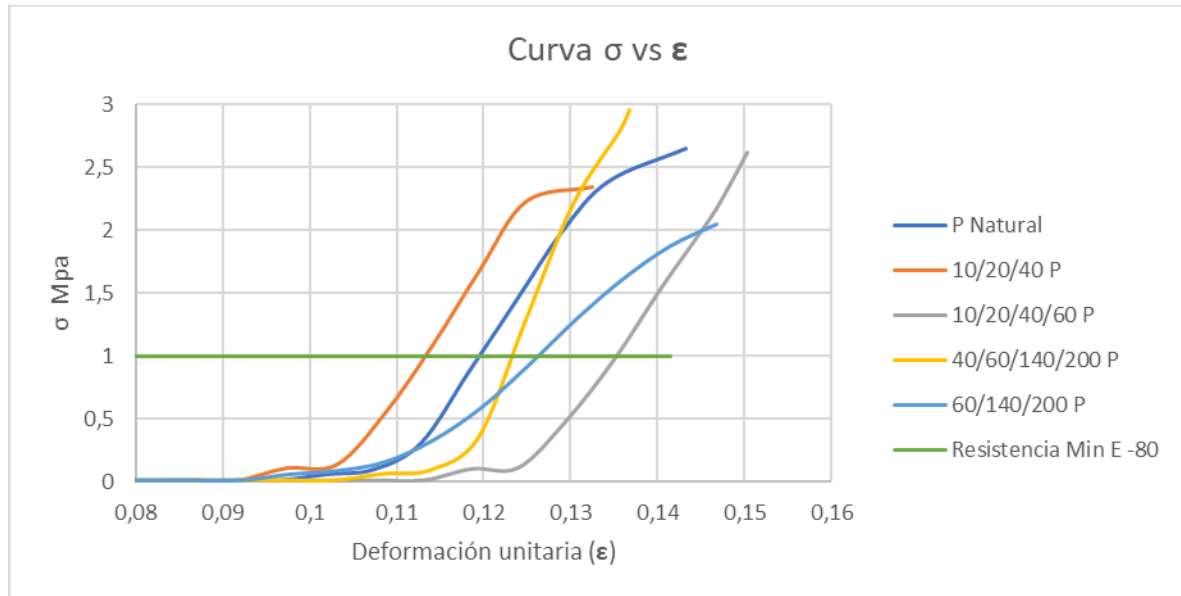
Por otro lado, la figura 41 evidencia el comportamiento del material proveniente del municipio de Barichara, donde el esfuerzo máximo obtenido al igual que en el caso anterior de Curití, se presentó en los especímenes con composición granulométrica natural, siendo este de 4.49 Mpa.

- B 10/20/40, para esta variación el esfuerzo disminuyó en un 23.25%
- B 10/20/40/60, para esta variación el esfuerzo disminuyó en un 13.65%
- B 40/60/140/20, para esta composición el esfuerzo de los especímenes se redujo en un 29.19%
- B 60/140/200, para esta variación el esfuerzo disminuyó 33.54%

En este análisis se puede observar un comportamiento similar al material del municipio de Curití, resaltando que los especímenes de Barichara tuvieron una mayor resistencia, alcanzando un esfuerzo último más grande. Sin embargo, la tendencia de la resistencia en las modificaciones disminuyó en presencia de material más grueso y de la misma manera en el material más fino.

Donde en este último, los especímenes sufrían aplastamiento antes de que se evidenciara la presencia de una falla. Su granulometría original que caracterizaba el material como una arcilla presentó el comportamiento más óptimo en términos de resistencia a la compresión.

**Figura 42.** Curva esfuerzo vs deformación unitaria de los especímenes del municipio de Piedecuesta



La figura 42 evidencia el comportamiento de los especímenes del municipio de Piedecuesta, donde el esfuerzo obtenido en las condiciones granulométricas naturales corresponde a 2.651 Mpa.

- P 10/20/40, para esta variación el esfuerzo disminuyó 11.73 %
- P 10/20/40/60, para esta variación el esfuerzo disminuyó un 1.09 %
- P 40/60/140/200, para esta variación el esfuerzo de los especímenes aumento en relación con la granulometría en condiciones naturales en un 11.58 %
- P 60/140/200, para esta modificación el esfuerzo disminuyó un 22.6 %

Para este último caso los valores de resistencia del material del municipio de Piedecuesta fueron los más bajos entre los materiales analizados. Sin embargo, en todos los casos se cumplió con la resistencia mínima establecida en E-80. Es importante resaltar que la tendencia de la resistencia fue diferentes a los casos anteriores. Este material corresponde a una arena arcillosa, por lo tanto, su composición es más granular. Es por eso por lo que la modificación que contemplaba la presencia de fino P 40/60/140/200 mejoró el comportamiento del material en relación con la granulometría original. Debido al incremento de la cohesión dentro de la matriz terrosa por la presencia de material fino que funciona como cementante para las partículas de mayor tamaño

**Figura 43.** Grafica comparativa de resultados de las diferentes muestras



La figura 43 permite evidenciar la comparación entre los resultados obtenidos para los diferentes municipios, donde se resalta que la muestra de Barichara tuvo un mejor comportamiento a compresión que los especímenes de Curití y Piedecuesta en todas las composiciones analizadas.

Ahora bien, las muestras de Curití estuvieron en el segundo lugar para las composiciones natural, 10/20/40 y 60/140/200. Así mismo, los especímenes de Piedecuesta contaron con un mejor comportamiento que los de Curití, para las composiciones intermedias de 10/20/40/60 y 40/60/140/200.

Finalmente, es posible afirmar que material que contó con un mejor comportamiento a compresión de las muestras analizadas fue el obtenido del municipio de Barichara en condiciones naturales. Sin embargo, la investigación permitió evidenciar que para el municipio de Piedecuesta es posible optimizar el comportamiento del material a partir de la manipulación de su composición. De modo que, la modificación que mejoró la resistencia del material fue la generada a partir de los tamaños de partículas retenidos en los tamices 40/60/140/200.

## **6. Conclusiones**

De los resultados obtenidos en el laboratorio para las tres muestras estudiadas de los municipios de Piedecuesta, Curití y Barichara se pudo identificar un patrón de comportamiento en relación con los ensayos de compresión inconfiada, en los cuales, los mayores valores de resistencia se obtuvieron a partir de los especímenes que presentan una disposición granulométrica mixta, es decir, el comportamiento del material fue óptimo cuando existía una proporción que relacionaba la cantidad de arenas y finos. Donde el contenido de finos era muy similar a las arenas, o incluso había un mayor porcentaje de estos.

La variación de la granulometría conllevó una disminución significativa en la capacidad portante del material, ya que al contar con un porcentaje significativo de arenas este disminuye su capacidad portante debido a que se reduce la cohesión presente entre las partículas. En contraparte, la presencia significativa de finos si bien aumenta la cohesión, el material es más susceptible a

deformarse con mayor facilidad. Este apartado se presenta en la figura 43, en la que se evidencia la capacidad portante del material en relación con su composición.

Los resultados de los ensayos realizados permiten validar las recomendaciones propuestas por el Manual del SENA, respecto a la relación de los porcentajes para finos y arenas. En donde se afirma que la mayor resistencia se obtiene para materiales que cuenten con una composición que se encuentre en los siguientes rangos: gravillas (0 al 15%), arenas (40 al 50%), limos (20 al 35%) y arcillas (15 al 25%) [15]. De igual forma, los resultados del ensayo a compresión ratifican que los suelos con mayor presencia de finos, como es el caso de Barichara y Curití presentan mayores resistencias en contraste con suelos más granulares como fue el caso de la muestra de Piedecuesta. Así mismo, a través de estos resultados se identificó que para todas las muestras y dosificaciones propuestas los materiales analizados cumplen el esfuerzo ultimo establecido por la normativa peruana E-80 de un 1 Mpa [23].

Por otra parte, las modificaciones de composición propuestas permitieron observar una tendencia de comportamiento para los materiales con presencia significativa de arcillas como es el caso de Barichara y Curití, donde la variación de las proporciones arenas/finos no mejoró la capacidad portante del material. Debido a que en su estado granulométrico natural el material contaba con la mejor proporción en relación con las variaciones. Sin embargo, la muestra del municipio de Piedecuesta al tratarse de un material más granular, no contaba con una proporción arenas/finos inicial optima. Por lo tanto, al disminuir la fracción de arenas a través de la modificación 40/60/140/200 se mejoró dicha proporción y se incrementaron los valores de resistencia. Esto debido a que el material fino podía envolver de una mejor manera las partículas de mayor tamaño, generando una mayor cohesión que brindó una mejor estabilidad a la matriz terrosa de la muestra.

El ensayo de compresión simple demostró que los patrones de falla de los especímenes son atribuibles a su composición. Donde se identificó que cuando los especímenes contaban con una composición de mayor contenido de partículas finas primaron las fallas que obedecen al aplastamiento debido a que las deformaciones transversales eran predominantes, generando fisuras paralelas a la dirección de la carga. Caso contrario a los especímenes que contaban con una composición más granular las fallas más evidentes se asociaban al cortante, dado que los materiales granulares presentan un menor ángulo de fricción interna, conllevando a una porosidad y permeabilidad significativa debido al tamaño de sus partículas [24], lo que denota una menor estabilidad del material y menos capacidad de deformarse generando fallas frágiles.

Finalmente, del análisis es posible concluir que hay diferentes variables que pueden modificar el comportamiento del material y por ende los resultados así se esté analizando un material de la misma procedencia y características granulométricas. Esto se evidencia en la desviación estándar entre especímenes, ya que variables como la humedad, compactación, tiempo de curado, acabados, desencofrado y demás influyen en el comportamiento mecánico de las muestras. Por lo tanto, dicha discrepancia se podría subsanarse al incrementar el número de especímenes realizados con el fin de disminuir la incertidumbre respecto a los resultados obtenidos.

### Referencias

- [1] B. S. Núñez Romero and C. A. Mejía Parada, “Análisis del comportamiento estructural de la técnica vernácula de muros de tapia pisada con inclusión de caña brava,” Universidad Pontificia Bolivariana, 2018.
- [2] L. Gil Mejía and D. Rendón Cárcamo, “Construcción en tierra: La tapia como respuesta funcional y espacial a la calidad de la vivienda.,” Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia., 2022.
- [3] D. Ruiz, C. López, E. Cortes, and A. Froese, “Nueva alternativa de construcción: Botellas PET con relleno de tierra.,” *En Apunt.*, vol. 25(2), pp. 292–303, 2012, [En línea]. Disponible: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1657-97632012000200011&script=sci\\_arttext&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1657-97632012000200011&script=sci_arttext&tlng=es).
- [4] L. Guerrero, M. Correia, and H. Guillaud, “Conservación del patrimonio arqueológico construido con tierra en iberoamérica.,” *Conserv. ibero-american Archaeol. Herit. built earth*, vol. 25, no. 2, pp. 210–225, 2012, [En línea]. Disponible: <http://ezproxy.uniandes.edu.co:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=91642368&lang=es&site=eds-live&scope=site>.
- [5] J. D. Pérez Pinilla, “Análisis de precios unitarios de construcciones tradicionales en tapia pisada en Boyacá y Santander,” Universidad Distrital Francisco José De Caldas, 2020.
- [6] J. A. Ruiz Sibaja and F. Vidal Sánchez, “Caracterización mecánica de piezas de adobe fabricado en la región de Tuxtla Gutiérrez,” *Rev. Espac. I+D Innovación más Desarrollo.*, vol. 4, no. 7, pp. 130–154, 2015, doi: 10.31644/imasd.7.2015.a05.
- [7] J. C. Rivera Torres, “El adobe y otros materiales de sistemas constructivos en tierra cruda : caracterización con fines estructurales,” *Apuntes*, vol. 25, pp. 164–181, 2012.
- [8] L. F. Guerrero, “Earth as a sustainable material for conservation,” *Estoa*, vol. 7, no. 13, pp. 51–60, 2018, doi: 10.18537/est.v007.n013.a04.
- [9] DANE, “Déficit habitacional,” 2020. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/deficit-habitacional> (accessed Dec. 09, 2022).
- [10] J. Bonilla and L. Durán, “Contemporización de lo vernáculo. Reinterpretación de la vivienda en tierra en la periferia de Villa de Leyva, Boyacá,” Universidad de la Salle, 2017.
- [11] H. L. Ardila Sarmiento, “Estudio de la resistencia a la tracción de muros en tapia pisada con inclusión de Biomasa residual en suelos de la ciudad de Bucaramanga, Santander.,” Universidad Pontificia Bolivariana, 2019.
- [12] G. Minke, *Manual Construcción En Tierra: La tierra como material de construcción y su*

- aplicación en la arquitectura actual*, 1st ed. 2005.
- [13] L. M. Benítez Rodríguez and C. J. Navas Corena, “Influencia de las propiedades físico-mecánicas en el material tierra para construcción con tapia pisada,” Universidad Industrial de Santander, 2009.
- [14] C. M. Martins Neves, O. Borges Farias, R. Rotondaro, P. Cevallos Salas, and M. Hoffmann, “Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra.” 2009, [En línea]. Disponible: <http://www.redproterra.org>.
- [15] SENA, “Construcción de Muros de Tapia y Bahareque.” 2012.
- [16] J. Daniel, “Introducción a la ciencia del suelo,” *introducción a La Ciencia Del Suelo*. p. 619, 2002.
- [17] S. R. Bolaños, “El uso masivo de la tierra como material de construcción en Colombia,” *SciELO*, vol. 20, no. 2, pp. 354–363, 2007, [En línea]. Disponible: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1657-97632007000200015&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1657-97632007000200015&script=sci_arttext).
- [18] L. M. Silva Rojas, P. V. Vecino Torres, and H. J. Jiménez, “La tapia pisada como técnica constructiva vernácula,” Universidad Santo Tomás, 2018.
- [19] F. Parra and C. Meneses, “Eestudio de valor de suelos y análisis de mercado inmobiliario debido a procesos donde se desarrolla la vivienda camprestre en los unicipios de San Gil, Barichara, Curití Y Pinchote.,” Universidad Distrital Fransisco Jose De Caldas, 2021.
- [20] Y. M. Guerra Pérez and L. R. Pérez Pinzón, “Emprendimiento rural-artesanal en el municipio de piedecuesta. tradiciones y proyecciones,” *La Terc. orilla*, vol. 23, 2019.
- [21] “Consistencia del Suelo.” [https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s08.htm](https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s08.htm) (accessed Dec. 09, 2022).
- [22] “COOMULTAGRO LTDA.” [https://coomultagro.com.co/Red\\_agencias.php](https://coomultagro.com.co/Red_agencias.php) (accessed Jan. 12, 2023).
- [23] Construcción y saneamiento Ministerio de vivienda, “Diseño y construcción con tierra reforzada NORMA E. 080.” 2017.
- [24] G. De Celis, D. Barcia, U. Navarro, G. De Celis, D. Barcia, and U. Navarro, “Determinación del parámetro de resistencia, ángulo de fricción Interna ( $\emptyset$ ) y su relación con los parámetros densidad relativa ( $D_r$ ) y relación de vacíos ( $e$ ) en suelos granulares,” *Cienc. e Ing.*, vol. 35, no. 3, pp. 135–146, 2014, [En línea]. Disponible: <https://bit.ly/3bAf2uM>.