

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En Piura-Perú se realizó la investigación “Análisis comparativo de la utilización del método de cono de arena y densímetro nuclear para determinar densidades de campo en suelos cohesivos para terraplenes procedente de la cantera Ramírez ubicada en el km 7+000 de la carretera “Piura-Paita”. En esta investigación se tomaron en cuenta 40 puntos de muestras en los cuales se determinó la densidad y el grado de compactación de cada uno de ellos. En la cual utilizo los dos métodos de ensayo Cono de Arena y Densímetro Nuclear determinando el método más confiable en cuanto a sus resultados para el control de la compactación en conformación de terraplenes. (Zeta,2019)

En Piura-Perú se realizó el siguiente trabajo de investigación “Comparación Técnica - Económica entre el Densímetro Nuclear y el método de Cono y Arena en la determinación de la Densidad In Situ” donde comparó los datos obtenidos, procedimientos y costos que implican el uso de estos métodos. Donde tomaron en cuenta las ventajas y desventajas acerca del modo de emplear ambos métodos en la determinación de la densidad In Situ. Se tomaron las muestras necesarias que requerían cada uno de los métodos tomando en cuenta las normas y procedimientos de seguridad. (Cruz,2020)

En Huancayo se presentó el trabajo de investigación “Control del grado de compactación In Situ, utilizando el deflectómetro de peso liviano (LWD) comparando a los resultados del método nuclear y el método del cono de arena para un tramo del proyecto Tocache-Juanjuí, en la región San Martín” se realizó esta comparación ya que los métodos cono de arena y densímetro nuclear se encuentran normados. También se estableció una correlación entre ambos métodos utilizados, para posteriormente realizar la correlación de ambos con el LWD. Se llegó a determinar que no se podía realizar dicha correlación donde posteriormente solo utilizó densímetro nuclear y LWD, llegando a la conclusión de que se varía en los resultados. (Berrocal,2019)

1.2 Situación problemática

La densidad es el cociente entre la masa de un suelo y su volumen a una temperatura determinada. Además de ser una propiedad importante por su función en el control de la compactación en terraplenes, la densidad es lo más significativo en esta investigación.

La reacción de la subrasante ante las diferentes cargas de tránsito depende de varios factores entre los cuales se incluye la densidad, esta propiedad puede variar en función del método de aplicación empleado ya sea cono de arena o densímetro nuclear.

Debido a que se tienen dos métodos para la determinación de la densidad in situ, se debe definir los rangos confiables de trabajo de cada uno de ellos, esto permitirá minimizar las variaciones en los resultados obtenidos.

Es pertinente llevar a cabo una comparación de las densidades obtenidas mediante los métodos del cono de arena y el densímetro nuclear, con el objetivo de determinar cuál de los dos métodos presenta un rango de trabajo más confiable.

1.2.1 Problema

¿Cómo varía la densidad in situ en subrasantes naturales obtenidas a través de los métodos: cono de arena y densímetro nuclear?

1.2.2 Relevancia y factibilidad del problema

Debido a que en la actualidad en nuestro país se utilizan ambos métodos para la determinación de la densidad in situ tanto cono de arena y densímetro nuclear, cuyos métodos están bajo norma que regulariza su uso, siendo de interés conocer las mismas definiendo así qué método es más confiable en la aplicación y los resultados obtenidos.

1.2.3 Delimitación temporal y espacial del problema

Los datos obtenidos en el desarrollo de la investigación seguirán siendo útiles mientras la capa subrasante no sufra ningún tipo de modificación.

Los tipos de suelo utilizados para esta investigación son A-4, A-6 y A-7.

1.3 Justificación

Es fundamental determinar cuál de los métodos, el cono de arena o el densímetro nuclear, ofrece un rango confiable de trabajo más amplio. Para esto, es esencial comprender las normativas que regulan cada uno de estos ensayos y, al mismo tiempo, evaluar las ventajas y desventajas operativas inherentes a cada método durante la ejecución del ensayo.

Es relevante destacar que el cono de arena es un método destructivo, en contraste con el densímetro nuclear que es no destructivo.

Dado que el equipo de densímetro nuclear fue recientemente incorporado al laboratorio de mecánica de suelos, esta investigación adquiere un valor significativo. Su contribución se traducirá en información valiosa para el uso eficiente y efectivo del densímetro nuclear, además de establecer una correlación precisa con los resultados obtenidos a través del método del cono de arena.

Esta investigación no solo abordará la elección del método óptimo para la determinación de densidad in situ, sino que también proporcionará directrices esenciales para el uso adecuado y la interpretación de los resultados obtenidos con el densímetro nuclear en el contexto de la composición y compactación de las subrasantes naturales.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Comparar las densidades en subrasantes naturales, considerando resultados obtenidos entre los métodos cono de arena y densímetro nuclear; para determinar los rangos confiables de trabajo de cada uno de ellos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las muestras de suelo.
- Definir el contenido de humedad óptimo y densidad máxima.
- Comparar los resultados de densidad in situ obtenidos entre el método cono de arena y densímetro nuclear.
- Establecer cuál de los métodos presenta el mayor rango confiable de trabajo.

1.5 Hipótesis

Se plantea que al comparar los valores de densidad in situ obtenidos por los métodos cono de arena y densímetro nuclear será posible establecer rangos de confiabilidad de trabajo que resulten aceptables.

1.6 Operacionalización de variables

- Variable dependiente: Densidad
- Variable independiente: Confiabilidad

1.6.1 Variable dependiente

Tabla 1.1 Variable dependiente

Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Densidad	Es una propiedad que relaciona su masa y el volumen.	Contenido de humedad óptima	Porcentaje (%)	Proceso de compactación T-99; valor extraído de la curva de compactación de las mezclas
		Densidad máxima	gr/cm ³	

Fuente: elaboración propia

1.6.2 Variable independiente

Tabla 1.2 Variable independiente

Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Confiabilidad	Se refiere a la comparación de valores obtenidos entre los ensayos cono de arena y densímetro nuclear	Método cono de arena	gr/cm ³	Necesita las muestras extraídas de campo para obtener los valores de densidad.
		Método densímetro nuclear	gr/cm ³	Determina rápidamente y con precisión el porcentaje de humedad y la densidad de suelos, directamente en el sitio

Fuente: Elaboración propia

1.7 Identificación del tipo de investigación

Esta investigación se trata de la comparación de densidades según el método de ensayo empleado, tratándose así de una investigación descriptiva-explicativa.

1.8 Unidades de estudio y decisión muestral

Las unidades de estudio y decisión ayudan a visualizar los elementos sobre el cual se desarrolló la investigación.

1.8.1 Unidad de estudio

La unidad de estudio de la presente investigación es la comparación de la densidad in situ en subrasantes naturales obtenidas entre los ensayos cono de arena y densímetro nuclear.

1.8.2 Población

La población tomada en cuenta en esta investigación es la subrasante de la Segunda Circunvalación de la ciudad de Tarija.

1.8.3 Muestra

Para la investigación se tomó las muestras de 30 puntos a lo largo de la Segunda Circunvalación. Tomando en cuenta las características propias del tramo para realizar la extracción de muestras.

Los ensayos que se requirieron para la elaboración de la investigación fueron:

- Ensayo de contenido de humedad.
- Ensayo de granulometría.
- Ensayo de límites de Atterberg.
- Ensayo de compactación T-99.
- Ensayo de densidad in situ cono de arena.
- Ensayo de densidad in situ densímetro nuclear.

1.8.4 Selección de las técnicas de muestreo

En la presente investigación se realizó un muestreo no aleatorio fue visual- intencional.

Para el muestreo se recolecto muestras en la subrasante de la Segunda Circunvalación de la ciudad de Tarija, por medio de calicatas y llevando un registro de cada una de ellas.

1.9 Métodos y técnicas empleada

Son fundamentales e indispensables para el desarrollo de la investigación, debido a que los métodos nos indican como desarrollar la investigación y las técnicas cómo se llevará adelante la investigación.

1.9.1 Métodos

Se utilizaron 2 métodos como son:

- Cono de arena ASTM. D1556
- Densímetro nuclear ASTM D2922

1.9.2 Técnicas

Las técnicas empleadas durante la investigación son la observación directa del lugar en estudio realizando visitas, también de experimentación al realizar los diferentes ensayos requeridos durante la investigación. Se realizó el análisis de normas que rigen cada uno de los ensayos.

1.10 Procesamiento de la información

Durante el desarrollo de la investigación se realizó la caracterización del suelo, seguido de la compactación para determinar su densidad máxima la cual sería requerida posteriormente durante la determinación de la densidad in situ con el cono de arena y el densímetro nuclear.

Se utilizó la estadística descriptiva para obtener la media y la desviación de las muestras y la estadística para establecer un intervalo de confianza de los resultados obtenidos de densidad seca del ensayo cono de arena, el cual fue definido como ensayo patrón; así mismo para determinar la confiabilidad de los resultados obtenidos de densidad seca en el ensayo densímetro nuclear.

1.11 Alcance de la investigación

La investigación consiste en realizar una comparación de la densidad in situ en subrasantes naturales entre los métodos cono de arena y densímetro nuclear, esta investigación se llevó a cabo en la subrasante de la Segunda Circunvalación, misma que fue seleccionada por

sus características, ya que presenta una subrasante natural donde los suelos predominantes son A-4, A-6 y A-7.

Se realizaron ensayos de densidad In Situ a través del ensayo cono de arena para el cual se utilizó arena del Saire la misma que se calibró según norma establecida también se realizó el ensayo de densímetro nuclear, el equipo utilizado durante este ensayo pertenece al laboratorio de suelos de la UAJMS el cual fue utilizado por primera vez, siendo así previamente calibrado por el personal capacitado y autorizado del laboratorio.

A través de los resultados obtenidos en ambos ensayos se estableció la comparación de la densidad seca, para determinar la confiabilidad de cada uno de los ensayos utilizando el cono de arena como ensayo patrón.

CAPÍTULO II

DENSIDAD IN SITU EN

SUBRASANTES

CAPÍTULO II

DENSIDAD IN SITU EN SUBRASANTES

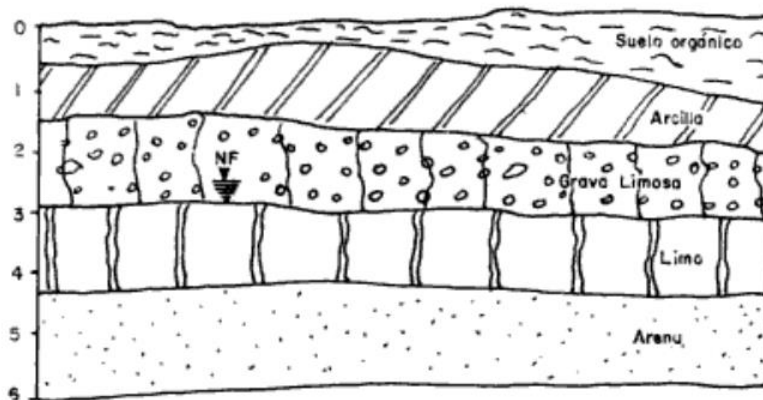
2.1 Suelo

Se denomina suelo a la parte superficial de la corteza terrestre, biológicamente activa que proviene de la desintegración o alteración física y química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que se asientan sobre ella. (Villalaz, 2004)

1. Los tipos de suelos más comunes son:

- Grava: son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de dos milímetros de diámetro. Como material suelto suele encontrarse en los lechos, márgenes y en los conos de los ríos. Sus partículas varían desde 7,62 cm (3") hasta 2 mm.
- Arenas: son materiales finos procedentes de la denudación de las rocas y sus partículas varían entre 2 mm y 0,05 mm de diámetro. Suelen encontrarse juntas en el mismo deposito que la grava.
- Limo: son granos finos con poca o ninguna plasticidad, su diámetro está comprendido entre 0,05 mm y 0,005 mm.
- Arcilla: son partículas sólidas con diámetro menor a 0,005 mm, tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua.

Figura 2.1 Perfil del suelo



Fuente: Villalaz, 2004

2.1.1 Propiedades físicas de las partículas del suelo

Las propiedades físicas de la partícula de suelo son las siguientes:

- Peso específico
- Tamaño
- Forma
- Características mineralógicas
- Rugosidad.

2.1.2 Tamaño de partícula de suelo

Las arcillas son en su mayoría partículas en forma de láminas microscópicas y submicroscópicas de mica, minerales de arcilla y otros minerales. Las arcillas se definen generalmente como partículas menores de 0,002 mm, en algunos casos las partículas de tamaño entre 0,002 mm y 0,005 mm también. Las partículas se clasifican como arcilla sobre la base de su tamaño, ya que no pueden contener necesariamente minerales de arcilla. (Braja Das,2010)

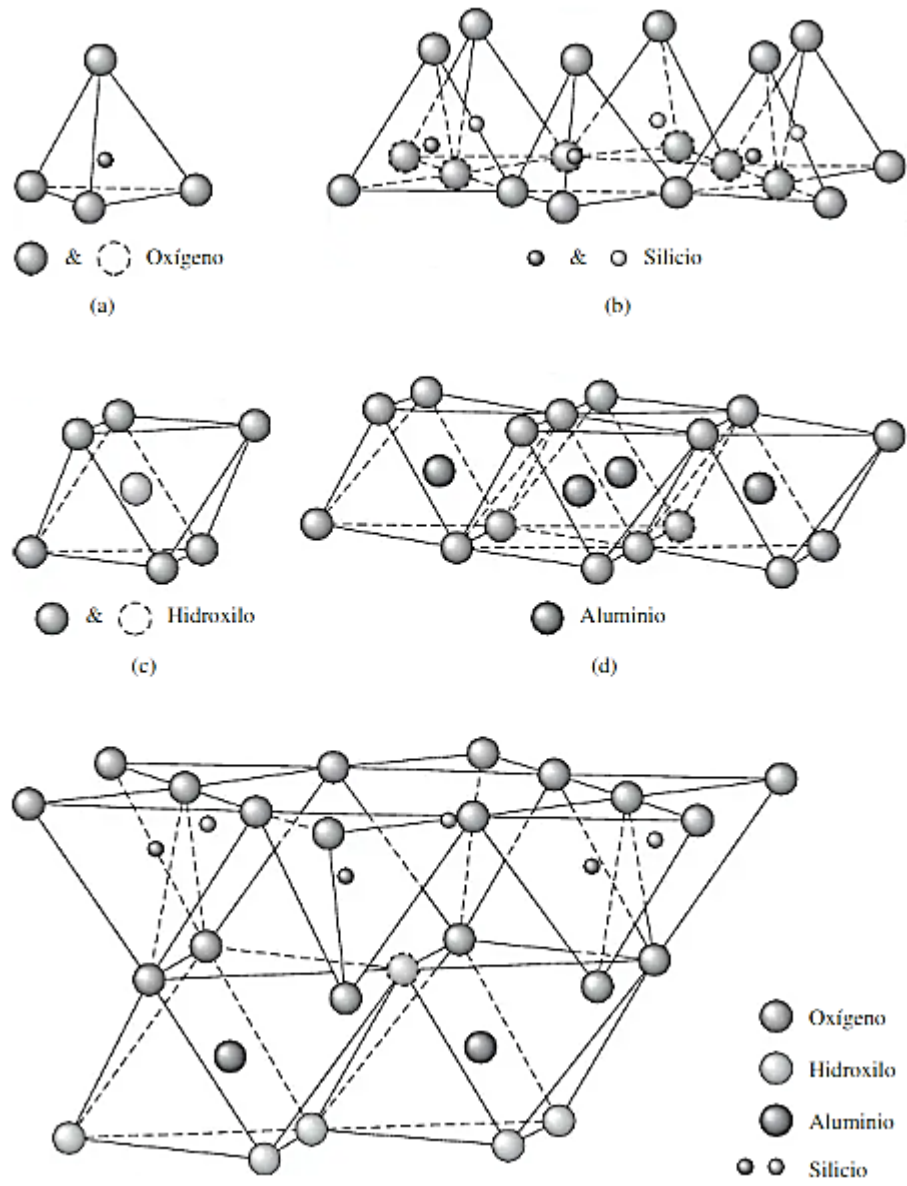
2.1.3 Minerales de arcilla

Los minerales de la arcilla son silicatos de aluminio complejos de una de las dos unidades básicas: sílice tetraédrica y aluminio octaédrico. (Braja Das,2010)

Las partículas de arcilla tienen una carga neta negativa en sus superficies. Este es el resultado de la sustitución isomorfa y de una ruptura en la continuidad de la estructura en sus bordes.

- a) Sílice tetraédrica
- b) Lámina de sílice
- c) Lámina de aluminio octaédrico
- d) Lámina octaédrica (gibbsita)
- e) Lámina de sílice gibbsita elemental

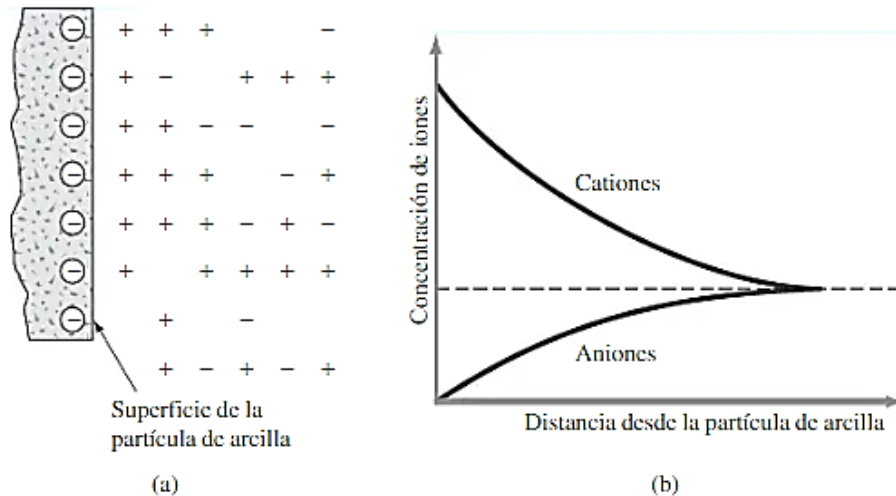
Figura 2.2 Minerales de la arcilla



Fuente: Braja Das, 2010

En arcilla seca la carga negativa se compensa con cationes intercambiables, como Ca^{++} , Mg^+ , Na^+ y K^+ , rodeando las partículas sostenido por la atracción electrostática. Cuando se añade agua a la arcilla, estos cationes y un pequeño número de aniones flotan alrededor de las partículas de arcilla. Esto se conoce como doble capa difusa. La concentración de cationes disminuye con la distancia desde la superficie de la partícula. (Braja Das,2010)

Figura 2.3 Capa doble difusa



Fuente: Braja Das, 2010

Las moléculas de agua son polares. Los átomos de hidrógeno no están dispuestos de una manera simétrica alrededor de un átomo de oxígeno, sino que se producen en un ángulo de enlace de 105° .

Como resultado de ello, una molécula de agua, actúa como una pequeña varilla con una carga positiva en un extremo y una carga negativa en el otro, esto se conoce como dipolo.

El agua dipolar es atraída por la superficie cargada negativamente de las partículas de arcilla y por los cationes en la capa doble. Un tercer mecanismo por el cual el agua es atraída por las partículas de arcilla es el enlace de hidrogeno, en el que los átomos de hidrogeno de las moléculas de agua son compartidos con los átomos de oxígeno en la superficie de la arcilla. (Braja Das,2010)

2.2 Subrasante

La Subrasante es la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado.

La subrasante es el asiento directo de la estructura del pavimento y forma parte del prisma de la carretera que se construye entre el terreno natural allanado o explanada y la estructura del pavimento. La subrasante es la capa superior del terraplén o el fondo de las excavaciones en terreno natural, que soportará la estructura del pavimento, está conformada por suelos seleccionados de características aceptables. (Montejo, 2002)

Figura 2.4 Subrasante natural



Fuente: elaboración propia

La subrasante tiene una gran influencia en la construcción del pavimento y en la eficiencia del mismo, así las subrasantes inestables presentan problemas relativos a la colocación y compactación de los materiales de la base y subbase y no dan el soporte adecuado para las subsiguientes operaciones de pavimentación, los problemas que se presentan no serán observados sino hasta que después de la culminación de la construcción, cuando la estructura entre en funcionamiento y deba soportar las cargas de tránsito. (Condori,2018)

Los esfuerzos, desplazamientos y agrietamientos son influidas en gran porcentaje por esta capa, un gran porcentaje de las deflexiones que se producen en la superficie de un pavimento se le puede atribuir a las subrasantes, por este motivo se debe asegurar una buena caracterización de la subrasante. (Condori,2018)

2.2.1 Funciones de la subrasante

- Soporta las cargas que transmite el pavimento.
- Sirve como cimentación del pavimento.
- Le da sustentación al pavimento.
- Evita que el terraplén contamine al pavimento y que sea absorbido por las terracerías. (Condori,2018)

2.2.2 Características de una subrasante

- Alta resistencia, permanencia de la resistencia por lo menos durante la vida útil del pavimento.
- Una buena uniformidad en todas las direcciones.
- Una alta densidad, poco susceptibles a cambios volumétricos.
- Poco susceptibles a la acción del agua.
- Buena trabajabilidad durante el proceso de compactación.
- Permanecía de las propiedades inducidas mediante la compactación.

En los procedimientos de construcción, los materiales se deben compactar con el equipo más adecuado, de acuerdo a sus características. (Condori,2018)

2.2.3 Subrasante constituida por limos plásticos y arcillas

Figura 2.5 Subrasante constituida por limos plásticos y arcillas



Fuente: Elaboración propia

En las subrasantes constituidas por suelos de baja compresibilidad, no suelen presentarse problemas especialmente en la estructura del pavimento. Los asentamientos son absorbidos por la estructura y la resistencia del terreno de cimentación es suficiente para soportar los terraplenes que hayan de ser construidos. (Revilla,2018)

En el caso de las subrasantes constituidas por suelos plásticos de alta compresibilidad que constituyen gran parte de terrenos de cimentación, están asociados a grandes problemas de falta de resistencia y compresibilidad, a no ser que su contenido de agua sea permanentemente muy bajo, el problema más grave que presentan este tipo de suelo es el asentamiento que se produce al aplicar la sobrecarga de la estructura vial. (Revilla,2018)

2.2.4 Materiales de una subrasante

- Se usarán materiales pertenecientes a los grupos A-1, A-2-4, o A-3 como se indica en las especificaciones de la AASHTO M-145, compactándolos hasta alcanzar el 100% de la densidad máxima.
- Los materiales pertenecientes a los grupos A-2-6, A-2-7, A-4, A-5, A-6 o A-7, podrán usarse si se compactan a no menos del 95% de la densidad máxima y con un contenido de humedad no menor del 95% de su humedad óptima. (Valle Rodas)

2.3 Regularización de la subrasante

Según el manual de especificaciones técnicas de la ABC, se debe realizar la regularización de la subrasante ETG 2-0.

Una vez terminado el movimiento de tierras (corte y relleno) y antes de la pavimentación se procede a la regularización de la subrasante.

Materiales

Tabla 2.1 Materiales de una subrasante

Características	Valor
Tamaño máximo (mm)	76,2
Valor soporte de California (CBR) (%) mínimo	2
Expansión máxima (%)	2
Grado de compactación (%)	95

Fuente: Manual de especificaciones técnicas ABC

Control de supervisión

- Un ensayo de compactación para la determinación de la densidad máxima, con un espaciamiento máximo de 100 m. lineales.
- Determinación de la densidad en sitio cada 100 m. lineales en los puntos donde fueron obtenidas las muestras para el ensayo de compactación.
- Determinación del contenido de humedad cada 100 m. lineales inmediatamente antes de la compactación.

Requerimientos de los materiales para una subrasante en México

Según la norma de calidad de los materiales de la S.C.T. (1987, Instituto Mexicano del Transporte) las especificaciones de los materiales son las siguientes:

Tabla 2.2 Características de los materiales de una subrasante

Características	Deseable	Adecuado	Tolerable
Tamaño máximo (mm)	75	75	75
Malla N°200 (%) máximo	25	35	40
Límite líquido (%) máximo	30	40	50
Índice plástico (%) máximo	10	20	25
Valor soporte de California (CBR) (%) mínimo	30	20	15
Grado de compactación (%)	100 mín.	100 ± 2	100 ± 2

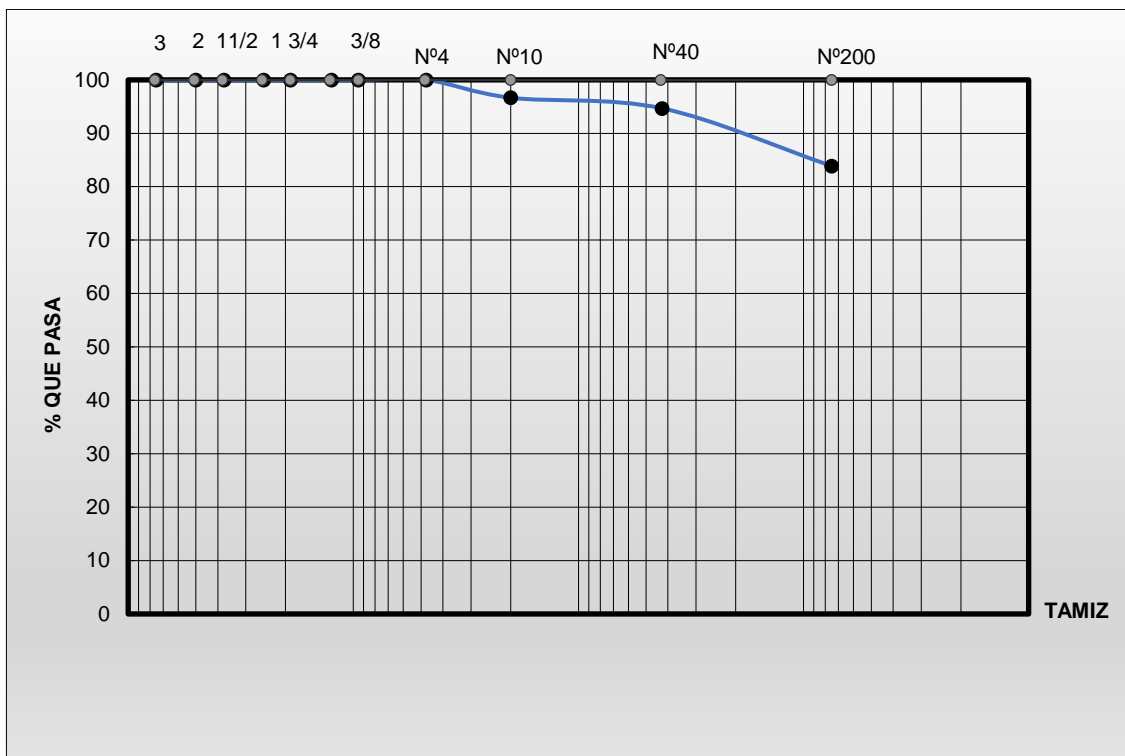
Fuente: Normas de Calidad de los Materiales de la S.T.C. (Instituto Mexicano del transporte)

2.4 Granulometría

Se refiere a la distribución de los diferentes tamaños de las partículas de un suelo (grava, arena, limo y arcilla). Expresado como un porcentaje en relación con el peso total de la muestra totalmente seca.

Dichos porcentajes se estudian para obtener una clasificación más objetiva del suelo en estudio; la variedad de los tamaños de las partículas es casi ilimitada. Teniendo como base la granulometría se puede proceder a realizar los demás ensayos ya que para cada tipo de suelo existen diferentes ensayos que se pueden ejecutar (Braja M. Das, 2012).

Gráfica 2.1 Granulometría



Fuente: Elaboración propia

2.5 Plasticidad

La plasticidad es la propiedad que presentan los suelos para poder deformarse, hasta cierto límite, sin romperse. Por medio de ella se mide el comportamiento de los suelos en todas las épocas. Las arcillas presentan esta propiedad en grado variable. Para conocer la plasticidad de un suelo se hace uso de los límites de Atterberg. (Villalaz, 2004).

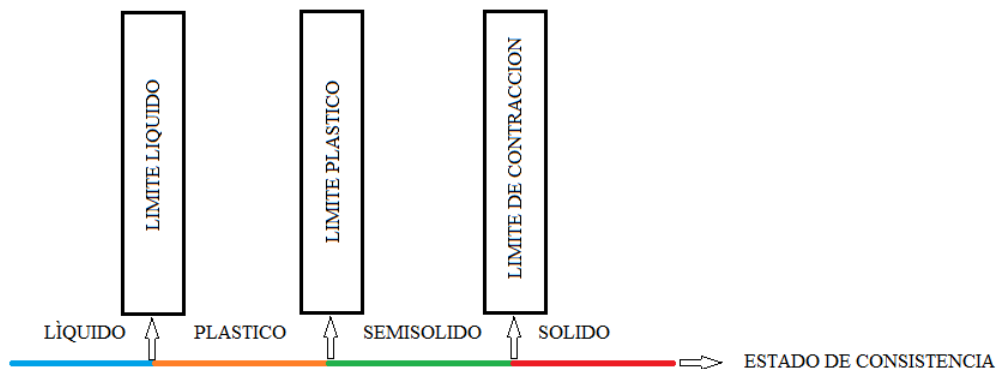
2.5.1 Límites de Atterberg

La consistencia del suelo es la fuerza con la que se mantiene unidos los materiales del suelo o la resistencia de los suelos a la deformación y ruptura.

Los límites de consistencia de Atterberg son propiedades de los suelos, con que se definen la plasticidad y se utiliza en la identificación y clasificación de un suelo.

La consistencia del suelo se puede estimar en el campo usando pruebas simples o se puede medir con mayor precisión en el laboratorio. Atterberg divide y considera tres tipos de límites de consistencia los cuales son: límite líquido, límite plástico y límite de contracción. (Jones,2019)

Figura 2.6 Límites de Atterberg



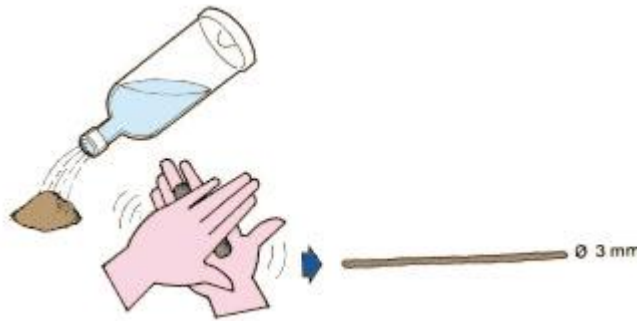
Fuente: Jones,2019

2.5.1.1 Límite plástico

Cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico.

Corresponde a la humedad necesaria para que bastones cilíndricos de suelo de 3mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0,5 cm a 1cm de largo y no puedan ser reamasados ni reconstituidos. (Villalaz,2004)

Figura 2.7 Límite Plástico



Fuente: Jones,2019

2.5.1.2 Límite líquido

Cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido. Para la determinación de este límite se utiliza la cuchara de Casagrande.

Corresponde a la humedad necesaria para que una muestra de suelo remoldeada, depositada en la cuchara de Casagrande y dividida en dos porciones separadas entre sí y se cierre en una longitud de 12mm, aplicando 25 golpes. (Villalaz, 2004)

Figura 2.8 Equipo Casa grande



Fuente: Elaboración propia

2.5.1.3 Índice de plasticidad

Se denomina Índice de plasticidad o índice plástico (IP) a la diferencia numérica entre los límites líquido y plástico, e indica el margen de humedades dentro del cual se encuentra en estado plástico tal como lo definen los ensayos.

Tanto el límite líquido como el límite plástico dependen de la cantidad y tipo de arcilla del suelo; sin embargo, el índice plástico depende generalmente de la cantidad de arcilla del suelo.

Comparando el índice de plasticidad con el que marcan las especificaciones respectivas se puede decir que si un determinado suelo presenta las características adecuadas para cierto uso. (Villalaz, 2004)

2.6 Clasificación de los suelos

La clasificación de los suelos es una categorización del suelo basado en características distintivas y en criterios de uso.

Para dar a conocer las propiedades de un suelo determinado, se vio la necesidad de concretar una clasificación científica, que se basa en el análisis de granulometría y en la plasticidad.

Los principales sistemas de clasificación científica de suelos actualmente en uso son el sistema AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) este es utilizado para la evaluación cualitativa de un suelo como material para la construcción cualitativa de explanadas de carreteras y el USCS O S.U.C.S (Unified Soil Classification System) es de uso general en cualquier estudio geotécnico. (Braja Das,2010)

2.6.1 Sistema de clasificación AASHTO

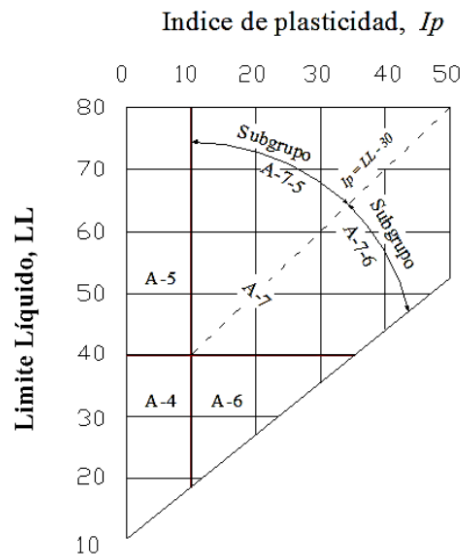
El sistema de clasificación fue desarrollado en 1929 como el sistema de clasificación de la oficina de Caminos Públicos y ha sufrido varias revisiones, con la versión actual propuesta por el comité para la clasificación de Materiales para Subrasante y caminos Tipo Granulares (1945). (Braja Das, 2010)

Tabla 2.3 Sistema de clasificación AASHTO

CLASIFICACIÓN	MATERIALES GRANULARES (35% O MENOS DEL TOTAL PASA EL TAMIZ N° 200)							MATERIALES LIMO ARCILLOSOS (MAS DEL 35 % DEL TOTAL PASA EL TAMIZ N° 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
											A-7-6
Porcentaje de material que pasa por el tamiz											
N° 10	50 máx.										
N° 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.								
N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la Fracción que pasa el tamiz N° 40											
LL:				40 máx.	41 mín.	40 máx.	40 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
IP:	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de grupo	0		0	0			4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.

Fuente: Guía de laboratorio

Figura 2.9 Carta de plasticidad



Fuente: Guía de laboratorio

El suelo se clasifica en siete grupos:

Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde 35% o menos de las partículas pasan por la malla N°200. Los suelos de los que más del 35% pasan por la malla N°200 son clasificados en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7.

2.7 Compactación

La compactación de los suelos es un tratamiento mecánico que se da al suelo en el campo con el fin de mejorar sus características de comportamiento mecánico y su permanencia ante el ataque de ciertos agentes del intemperismo. (Badillo, 2005)

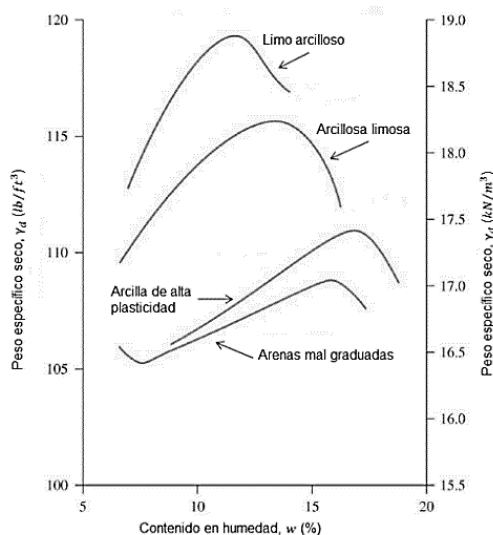
Es decir, la compactación incrementa las características de resistencia de los suelos, aumentando así, la capacidad de carga en las cimentaciones construidas sobre ellas.

Para su determinación se utiliza la Prueba de Proctor estándar.

El principal objetivo de la compactación es mejorar las propiedades de los suelos:

- Mejorar las propiedades mecánicas del suelo.
- El proceso de compactación es la densificación rápida de un suelo, sin pérdida de humedad.
- Generar a partir de un suelo un material con las propiedades mecánicas apropiadas.

Figura 2. 1 Curvas de compactación de distintos tipos de suelos



Fuente: Braja Das (2010)

La forma de la curva de compactación depende básicamente del tipo de suelo. Para suelos finos, cuanto menor sea el tamaño de la partícula, mayor es el contenido de humedad óptimo (w) y cuanto más grueso es el suelo mayor es el peso específico seco máximo (γ). (Das, 2010)

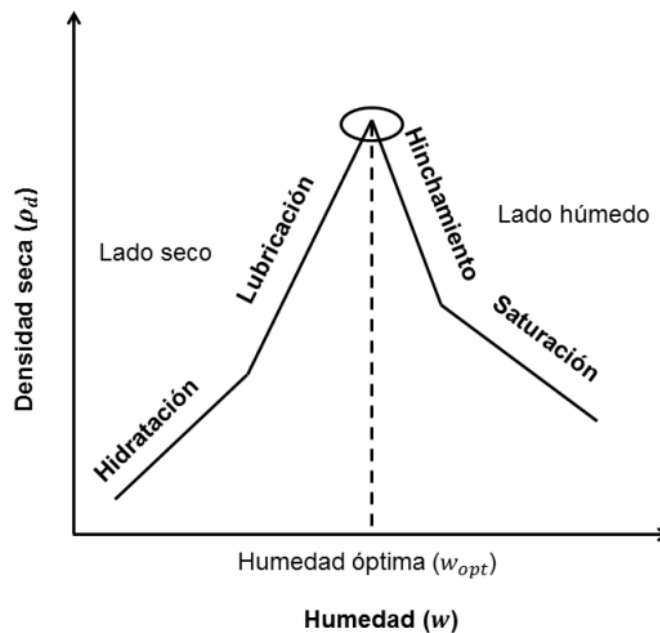
2.7.1 Factores que afectan a la compactación

Existen una serie de factores que influyen en la evolución y en el grado de compactación de los suelos que se pueden ser intrínsecos o externos. Los factores intrínsecos o propios del suelo son, su mineralogía, distribución granulométrica, contenido en finos. Entre los factores externos tenemos la influencia de la humedad en el proceso de compactación, el método y la energía de compactación propiamente utilizados. (Kraemer et al.,2004)

2.7.1.1 Humedad de compactación

Uno de los factores externos más importantes a la hora de tener en cuenta es la influencia de la humedad (w) en el proceso de compactación respecto a la densidad seca (ρ_s) como se observa en la siguiente figura. (Proctor, 1933)

Figura 2.10 Influencia de la humedad



Fuente: Proctor, 1933

2.7.1.2 Energía de compactación

Para proceder a la compactación, se transmite al material una energía determinada. El efecto de la energía varía según el mecanismo de transmisión (tipo de compactación) y la magnitud de energía comunicada. Cada tipo de compactación dará lugar a una diferente relación humedad-densidad seca para cada clase de suelo.

En el caso de suelos arcillosos, el método de compactación puede afectar a la estructura del suelo, por tanto, a sus propiedades.

Un aumento de energía de compactación por unidad de volumen conduce a un incremento de la densidad seca máxima y una disminución de la correspondiente humedad óptima de compactación. (Kraemer et al.,2004)

2.7.1.3 Tipo de suelo

El comportamiento de un suelo sometido a compactación del tipo de suelo (granular o cohesivo). Los suelos granulares bien graduados, un poco finos de naturaleza poco plástica, presentan los mayores valores de las densidades secas asociados a humedades óptimas bajas. Los suelos arcillosos muy plásticos tienen densidades más bajas y elevadas humedades óptimas de compactación. (Kraemer et al., 2004)

Tabla 2.4 Características generales de compactación

Clasificación AASHTO	Ensayo Proctor	
	Densidad seca máxima (Kg/dm ³)	Humedad óptima (%)
A-1	1,85 - 2,25	7- 15
A-2	1,75 - 2,15	9 – 18
A-3	1,75 - 1,85	9 – 15
A-4	1,50 - 2,10	10 – 20
A-5	1,35 - 1,60	20 – 35
A-6	1,50 - 1,90	10 - 30
A-7-5	1,35 - 1,60	20 – 35
A-7-6	1,45 - 1,85	15 - 30

Fuente: Kraemer et al., 2004

2.7.2 Especificaciones para la prueba Proctor modificado

Para la prueba Proctor modificado tenemos tres métodos, de los cuales se debe elegir un método de acuerdo a las características del suelo que tenemos. En nuestro caso se utilizó el **Método A** según las características obtenidas en la caracterización del suelo.

Tabla 2.5 Especificaciones para la prueba Proctor Modificado

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	101,6 mm	101,6 mm	152,4 mm
Volumen del molde	943,3 cm ³	943,3 cm ³	2124 cm ³
Peso del Pisón	44,5 N	44,5 N	44,5 N
Altura de caída del pisón	457,2 mm	457,2 mm	457,2 mm
Número de golpes del pisón por capa de suelo	25	25	56
Número de capas	5	5	5
Energía de compactación	2696 KN-m/m ³	2696 KN-m/m ³	2696 KN-m/m ³
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla N°4 (4,75 mm). Se usa si 20% o menos por peso de material es retenido en la malla N°4	Porción que pasa la malla de 9,5 mm. Se usa si el suelo retenido en la malla N°4 es más del 20% y 20% o menos por peso es retenido en la malla de 9,5 mm.	Porción que pasa la malla de 19 mm. Se usa si más de 20% por peso de material es retenido en la malla de 9,5 m, y menos de 30% por peso es retenido en la malla de 19 mm.

Fuente: Braja Das, 2010

2.8 Grado de compactación

Es la relación entre el peso volumétrico seco obtenido en el ensayo de campo y el máximo peso volumétrico seco obtenido en la prueba de laboratorio expresado en porcentaje. (Badillo, 2005)

$$GC\% = \frac{\gamma_{In Situ}}{\gamma_{Max}}$$

Donde:

GC%= grado de compactación en porcentaje.

$\gamma_{In Situ}$ = Densidad determinada por el cono de arena.

$\gamma_{In Situ}$ = Densidad Máxima de la curva de compactación.

Es decir, el grado de compactación es una medida que indica el nivel de densidad alcanzado en un suelo compactado en relación con su densidad máxima teórica. Es una importante medida para evaluar la eficiencia de la compactación y garantizar que el suelo cumpla con los requisitos de capacidad de carga, estabilidad y resistencia necesarios para una construcción segura y duradera.

Según Duque Escobar y Escobar Potes, los valores de G_C para diferentes exigencias son:

$G_C = 90\%$ es el mínimo para pocas exigencias de resistencia e incompresibilidad.

$G_C = 95\%$ es el mínimo para terraplenes.

$G_C = 100\%$ es el mínimo para subrasantes.

La Secretaría de obras públicas de México tiene la norma de no compactar el cuerpo de las terracerías a menos del 90% en ningún caso, y exige el 95% en una porción superior de los terraplenes y el 100% en capas subrasantes y en las diversas capas del pavimento. (Rico,1976)

2.9 Densidad

La densidad absoluta de un cuerpo es la masa de dicho cuerpo contenida en la unidad de volumen, sin incluir sus vacíos. (Villalaz,2004)

$$\rho_s = \frac{W_s}{V_s}$$

Donde:

ρ_s = Densidad del suelo

W_s = Peso seco del suelo

V_s = Volumen del hoyo

Un suelo muy poroso será menos denso; un suelo poco poroso será más denso. Esto depende directamente a sus propiedades físicas de los suelos.

Los suelos arenosos de baja porosidad tienen mayor densidad (1,2 gr/cm³ - 1,8 gr/cm³) que los suelos arcillosos (1 gr/cm³ - 1,6 gr/cm³).

Existen 2 tipos de densidades las cuales son:

1. Densidad Húmeda: es el peso del material in situ, por unidad de volumen.
2. Densidad Seca: es el peso del material seco por unidad de volumen en el sitio. Este es el que se trata de determinar en la prueba de densidad de campo y el que se compara con el valor de densidad máxima obtenida en la prueba de Proctor modificado para obtener el grado de compactación.

2.9.1 Densidad natural o densidad in situ

Un suelo natural o compactado requiere de la densidad in situ. Esta verificación se logra con los ensayos de cono de arena o por el densímetro nuclear.

La consideración de la densidad natural es cuando el suelo no ha sido expuesto a ningún tipo de compactación mecánica, y que solamente por fenómenos naturales se auto consolidó. (Purizaca,2020)

Factores que afectan a la densidad

Algunos factores que afectan la densidad de una subrasante natural son:

- **Variabilidad de la densidad:** La densidad en subrasantes naturales puede variar considerablemente dependiendo del tipo de suelo y las condiciones geológicas del sitio. Algunos suelos naturales pueden tener una densidad relativamente alta debido a su estructura y contenido de humedad, mientras que otros suelos pueden tener una densidad baja debido a su origen y características físicas. (Lopez,2011)
- **Influencia de la compactación natural:** Los suelos en subrasantes naturales pueden haber experimentado cierto grado de compactación natural debido a procesos geológicos, como la sedimentación, la compactación por peso propio o la actividad biológica. Esta compactación natural puede contribuir a una densidad relativamente mayor en comparación con suelos no compactados. (Lopez,2011)
- **Importancia del estudio geotécnico:** Antes de la construcción de una estructura de pavimento, es fundamental realizar un estudio geotécnico exhaustivo del sitio para evaluar las propiedades del suelo en las subrasantes naturales. Esto implica la realización de pruebas de campo y de laboratorio para determinar la densidad y otras características del suelo, como su capacidad de soporte y suelos expansivos. (Lopez,2011)
- **Evaluación de la densidad:** Para evaluar la densidad en subrasantes naturales, se pueden realizar pruebas in situ, como el ensayo de densidad in situ con equipo nuclear o el uso de penetrómetros para medir la resistencia y obtener una estimación indirecta de la densidad. Estas pruebas ayudan a obtener información sobre las propiedades del suelo y su densidad en el sitio específico. (Lopez,2011)
- **Consideraciones en el diseño:** La densidad en subrasantes naturales influye en el diseño del pavimento y la selección de las capas de relleno o base necesarias. Se debe tener en cuenta la capacidad de carga, la estabilidad y la deformación del pavimento al considerar la densidad existente en las subrasantes naturales. (Calderón, 2018)

Propiedades del suelo que son afectadas por la densidad:

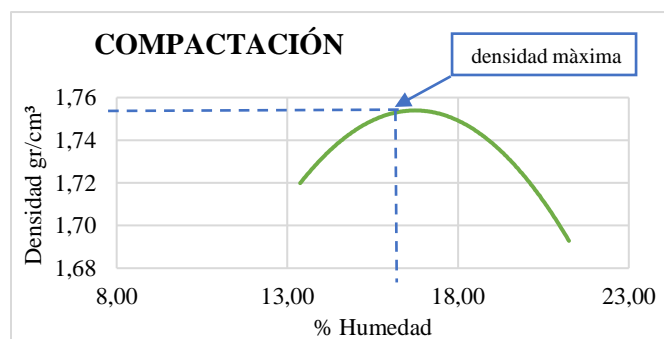
- **Resistencia:** un suelo más denso tiende a ser más resistente y menos propenso a la deformación bajo la aplicación de cargas. Por otro lado, un suelo con baja densidad tiende a tener menor resistencia, debido a que sus partículas se encuentran más separadas y tienen menos fricción y cohesión entre ellas; por lo tanto, son más susceptibles a la deformación y la compresión bajo cargas aplicadas. (Lopez,2011)
- **Permeabilidad:** puede influir en su capacidad para permitir el flujo de agua. Cuando un suelo es más denso tiene menor porosidad y permeabilidad, lo que dificulta el drenaje y aumenta el riesgo de acumulación de agua. (Lopez,2011)
- **Estabilidad:** cuando presenta una buena densidad ofrece una base más estable para las capas superiores, lo que reduce el riesgo de asentamiento o deformaciones. La densidad adecuada contribuye a mantener la integridad estructural de la subrasante a lo largo del tiempo y evita problemas como hundimientos o agrietamientos. (Calderon,2018)

2.9.2 Densidad seca máxima

Es la máxima densidad que se puede obtener en laboratorio de un material luego de un proceso de compactación en molde normalizado, y capas de acuerdo al tipo de material, con su óptimo contenido de humedad. Se utiliza el ensayo Proctor Modificado por el desarrollo de rodillos pesados para el uso de compactación en campo (Purizaca,2020)

Esta densidad es usada para comparar y poder lograr que la compactación en campo de cualquier terreno sea igual a la obtenida en laboratorio, es decir la densidad máxima.

Gráfica 2.2 Determinación de densidad máxima



Fuente: Elaboración propia

2.10 Métodos para la determinación de la densidad del suelo

2.10.1 Método cono de arena

El método cono y arena determina la densidad de suelos cuyo tamaño máximo absoluto de partículas sea menor o igual a 50 mm (2”), es requisito que el material donde se realiza el ensayo posea cohesión suficiente y así las paredes del agujero continúen estables.

El método cono de arena se caracteriza por ser destructivo y se necesita las muestras extraídas de campo para obtener los valores de densidad. Para este método se utiliza un cono el cual es un aparato medidor de volumen, provisto de una válvula cilíndrica; que controla el llenado del cono. Un extremo termina en forma de embudo y su otro extremo se ajusta a la boca de un recipiente. El aparato tiene una placa base la cual facilita la ubicación del cono de densidad. Cuenta con arena normalizada. (Zeta,2019)

Figura 2.11 Equipo cono de arena – arena del Saire

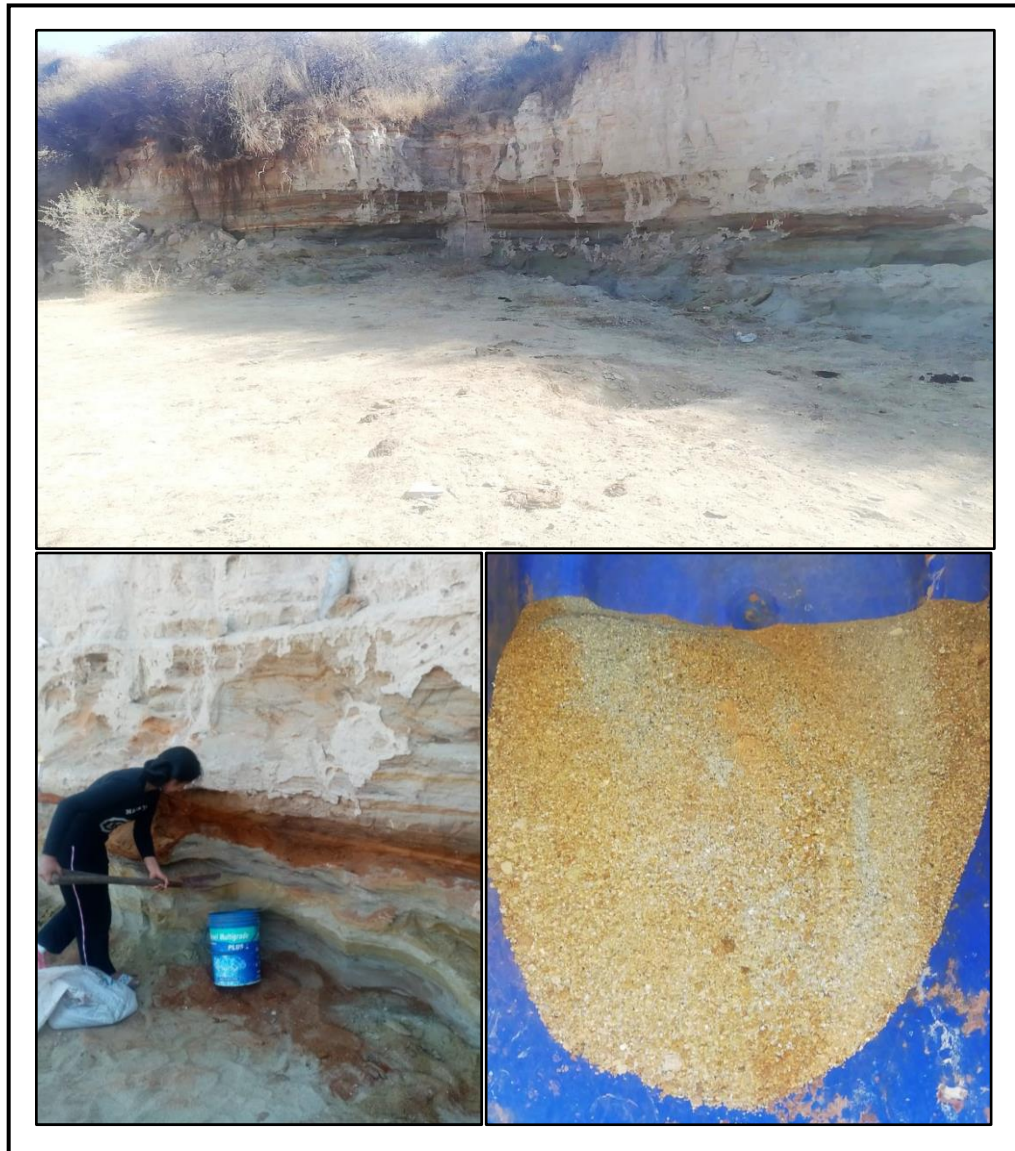


Fuente: Elaboración propia

2.10.1.1 Arena calibrada

La arena que se utiliza debe ser limpia y seca, prefiriéndose aquella de granulometría – redondeada y comprendida entre los tamices N°16 y N°30. La arena utilizada durante este ensayo fue extraída de la localidad del Saire, se encuentra ubicada en el municipio de Padcaya.

Figura 2.12 Extracción arena del Saire



Fuente: Elaboración propia

2.10.2 Método densímetro nuclear

El densímetro nuclear es un equipo electrónico de medición capaz de determinar rápidamente y con precisión el porcentaje de humedad y la densidad de suelos, directamente en el sitio, sin tener que recurrir al laboratorio, lo que conllevaría a mayor tiempo de espera, que en la mayoría de los casos no se cuenta, por la celeridad de las obras.

Figura 2.13 Equipo densímetro nuclear



Fuente: Elaboración propia

a) Funcionamiento

La determinación de la densidad total o densidad humedad a través de este método, está basada en la interacción de los rayos gamma provenientes de fuente radiactiva y los electrones de las orbitas exteriores de los átomos del suelo, la cual es captada por un detector gamma situado a corta distancia de la fuente emisora, sobre, dentro o adyacente al material a medir.

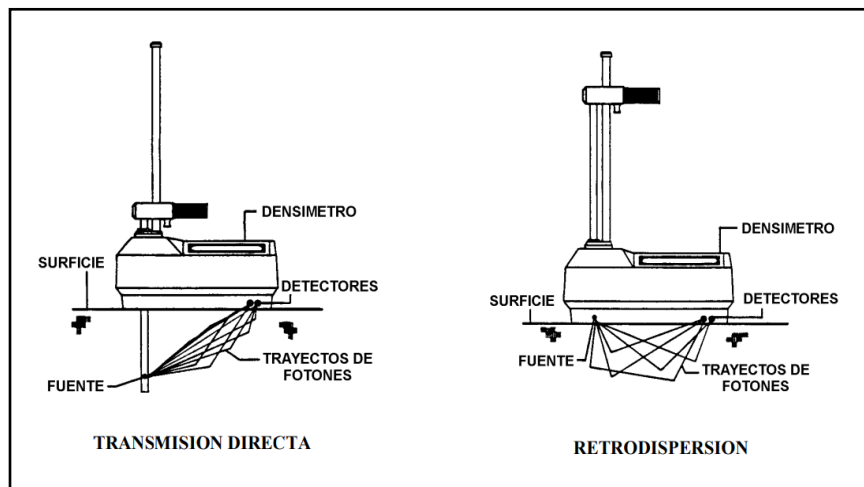
Como el número de electrones presente por unidad de volumen de suelo es proporcional a la densidad de este, es posible correlacionar el número relativos rayos gamma dispersos con el número de rayos detectados por unidad de tiempo, el cual es inversamente proporcional a la densidad. La lectura de la intensidad de la radiación es convertida a medida densidad por medio de una curva de calibración apropiada del equipo.

El densímetro Troxler modelo 3430 tiene dos modos de operación: el modo de **transmisión directa** (la varilla con la fuente perforando el material) y el modo de **retrodispersión** (la varilla con la fuente se encuentra próximo, pero no perforando, el material que será medido).

El modo de transmisión directa, la varilla con la fuente de Cesio 137 se introduce en el terreno hasta la profundidad deseada. Los detectores en la base de la sonda se cuantifican la radiación emitida por la varilla con la fuente. Para llegar a los detectores, los fotones gamma deben primero pasar a través del material donde chocan con los electrones allí presentes.

Mientras menor sea el número de fotones que alcancen a los detectores, mayor será la densidad del material. (Manual Troxler, 2003)

Figura 2.14 Tipos de transmisión



Fuente: Manual del usuario densímetro para medición de humedad-densidad

- **Transmisión directa:** este tipo de transmisión es la más riesgosa debido a que la fuente reactiva sale del aparato. En este modo de operación la fuente gamma se posiciona a una profundidad específica, dentro de la capa del material a evaluar, mediante su inserción a través de un orificio de acceso hecho con la varilla de perforación. Las emisiones gamma son transmitidas a través del material, hacia los

detectores, dentro del densímetro. Este tipo de operación minimiza la incertidumbre ocasionada por las superficies rugosas y la composición química del material evaluado, determinando una elevada exactitud en las mediciones. La transmisión directa es utilizada para la evaluación en capas de espesor medio a grueso, de suelos, agregados, capas asfálticas o losas de concreto hidráulico. (Manual Troxler,2003)

- **Retro – transmisión:** en el modo de Retro – transmisión, los fotones gamma deben ser dispersados (o reflejados) por lo menos una vez, antes alcanzar a los detectores en la sonda. Para efectuar este proceso, se coloca la varilla de manera que, la fuente y los detectores se encuentran en el mismo plano, denominado posición de retro – transmisión. Los fotones provenientes de la fuente penetran en el material, y los que se dispersen son medidos por los detectores. A fin de evitar que los fotones pueden acceder a los detectores directamente, sin ser dispersados por el material, la sonda dispone de blindajes entre la fuente y los detectores. (Manual Troxler,2003)

b) Mediciones que se obtienen:

El densímetro nuclear es capaz de determinar rápidamente y con precisión la humedad y la densidad de suelos, bases, agregados (áridos), hormigón y asfalto (hormigón asfáltico), sin tener que recurrir a métodos de intervención física.

Para obtener el porcentaje de compactación (%) y el contenido de humedad (%) en el suelo, se necesita la densidad seca obtenida del ensayo Proctor.

c) Limitantes

Existen algunos factores que pueden afectar en las medidas de la densidad in situ como son:

- Si el material posee compuestos químicos puede afectar la medida de densidad.
- Si el material no es homogéneo o la superficie no es regular.
- Si se calcula por retrodispersión las medidas de densidad y contenido de agua son influenciadas principalmente por el material en la superficie.

- Si se calcula por transmisión directa los calores de densidad y contenido de agua son el promedio de todos los valores obtenidos desde la punta del vástago hincado dentro del suelo a la superficie.
- Las partículas sobredimensionadas o grandes vacíos pueden causar lecturas o medidas de mayor o menor densidad.
- Otro equipo radioactivo debe estar alejado por lo menos 9 m.

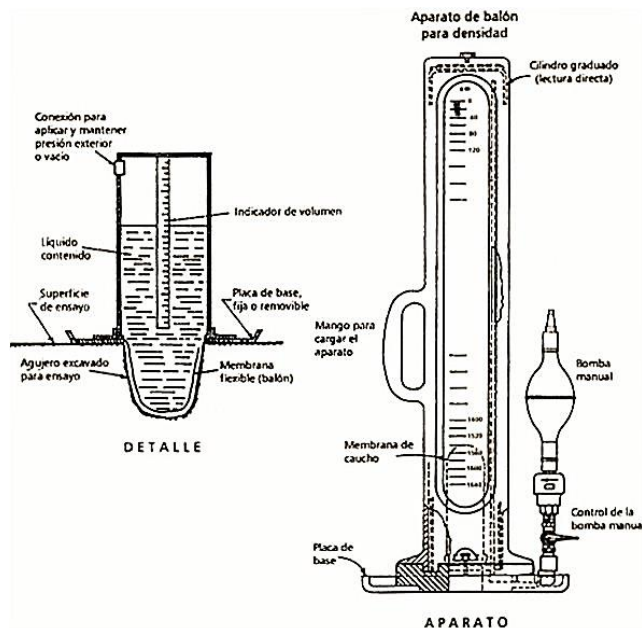
(Juarez,2018)

2.10.3 Método balón de caucho (ASTM D2167)

Este método se refiere a la determinación del peso unitario en el terreno de un suelo compactado o firmemente unido, mediante un aparato con una membrana de caucho. Sin embargo, no es aconsejable para un suelo muy blando, que se deforme bajo una presión leve, o en el cual pueda mantenerse con un valor constante el volumen del hueco.

La profundidad estará entre los 10 cm y 15 cm.

Gráfica 2.3 Equipo balón de caucho



Fuente: INVIAS,2012

Este método se puede utilizar para determinar la densidad de los suelos compactados utilizados en la construcción de terraplenes, subrasantes, capas inferiores de pavimentos y rellenos estructurales.

Este ensayo es apropiado para suelos que no contengan fragmentos de roca triturada o materiales que presenten bordes puntiagudos, debido a que ellos pueden pinchar la membrana del balón de caucho, inutilizándola.

Procedimiento:

Se determina el volumen de un agujero excavado en un suelo dado, usando un recipiente calibrado lleno de un líquido con el cual insufla una delgada membrana de caucho flexible, la cual se va desplazando dentro del agujero, tomando su forma hasta que se llena totalmente con el líquido. La densidad humedad en el sitio se determina dividiendo la masa húmeda del suelo que se remueve, por el volumen del agujero. El contenido de agua del suelo (humedad) y la densidad humedad en el sitio se usan para calcular la densidad seca y el peso unitario seco in situ.

2.10.4 Método del densímetro eléctrico

Mide y muestra la densidad húmeda y seca, contenido de humedad gravimétrico y de grado de compactación. Además, es capaz de entregar medidas comparables a aquella logradas con los métodos tradicionales, como las nucleares y cono de arena.

Este equipo utiliza radiofrecuencia de punto a puntos (entre los dardos hincados en el suelo), asegurando positivas medidas a la profundidad de los electrodos (4", 6", 8", 10" y 12" de altura es la medida estándar de los dardos).

No es indispensable asegurarse que el suelo sea homogéneo; se puede confiar en la onda de radio frecuencia para penetrar los materiales del suelo desde la superficie y de esta manera determinar el contenido de humedad y el grado de compactación. (Ortega,2018)

Los datos que se requieren son:

- Clasificación del material según el método SUCS
- Densidad seca máxima
- Contenido de humedad óptimo.

Figura 2.15 Densímetro eléctrico



Fuente: Corporación C4 Equipos y laboratorio

Uso del densímetro eléctrico:

- El operador comenzará con la creación de un nuevo modelo de suelo, y la asociación de un nuevo modelo de suelo, y la asociación de este con el lugar de trabajo.
- Se coloca la plantilla en el lugar correspondiente y los dardos se ubican en los agujeros de esta. Las 4 mediciones eléctricas se promedian generando valores típicos los cuales representan las características del lugar.
- Gracias a los 4 dardos se obtienen las propiedades dieléctricas del suelo, las cuales se relacionan con la densidad húmeda y el contenido de humedad del suelo.
- Posterior a obtener los datos eléctricos, el operario deberá introducir los datos obtenidos.
- Finalmente se procede a realizar las mediciones y la pantalla led muestra las propiedades del suelo compactado.

2.10.5 Determinación de la densidad mediante obtención de muestras inalteradas

Para extraer una muestra inalterada, deberá excavar cuidadosamente el terreno que rodea a la muestra que se desea obtener.

Inmediatamente después obtenida la muestra, se toma una pequeña cantidad del material, a fin de determinar su contenido de humedad.

Una vez secada la muestra, se alisa su superficie, se la pesa y luego se la cubre de parafina líquida. Antes de pesar la muestra, debe dejarse enfriar y solidificar la parafina colocada. La muestra cubierta con parafina, se pasa nuevamente a fin de determinar el peso de la parafina añadida. El peso por unidad de volumen de la parafina es de 881 kg/m^3 .

Para determinar el volumen de la muestra cubierta con parafina, se la sumerge en agua y la cantidad de líquido desalojado. A este volumen obtenido a restarle el volumen de la parafina para conocer el volumen de la muestra propiamente dicha.

Conociendo el peso de la muestra y su obtención de contenido de humedad, se calculará su densidad en kg/m^3 . Esta densidad debe estar referida al peso del material seco.

Otro procedimiento para la obtención de muestras inalteradas, es mediante la hincada de un cilindro de bordes cortantes y dimensiones conocidas, una vez introducido el cilindro, se quita el terreno que queda a su alrededor y se extrae cuidadosamente el cilindro que contiene la muestra.

Al igual que la muestra anterior se toma una pequeña muestra representativa para determinar el contenido de humedad del material. Como quiera que se conoce el volumen del cilindro metálico, bastara para determinar el peso del material seco extraído, para obtener la densidad de la muestra. (Valle Rodas,1963)

2.10.6 Determinación de la densidad de campo mediante el penetrómetro

La aguja Proctor se utiliza también para determinar el grado de compactación del material en el terreno. El procedimiento que se emplea es el siguiente: se mide la resistencia a la penetración de la muestra compactada en laboratorio a humedad óptima y densidad máxima. Si el material ha sido debidamente compactado en el campo, presentara aproximadamente, la misma resistencia registrada en laboratorio. (Ortega,2018)

2.10.7 Determinación de la densidad mediante volumen de la tierra extraída

La medida de la densidad del material en el terreno puede hacerse, así mismo, extrayendo una muestra de la capa compactada y midiendo el volumen del hueco dejado por el material extraído. Este volumen puede medirse mediante el empleo de agua, aceite pesado, o arena. (Valle Rodas,1963)

2.10.8 Empleo de aceite grueso

Se hace un pequeño hueco y se extrae la tierra, depositándola en un frasco. Se registra el peso de la muestra y se calcula su contenido de humedad. Le volumen del hoyo, se mide llenándolo con aceite grueso 30 o 40. Como se conoce el peso de la muestra seca, bastará dividir este peso por el volumen del aceite que sido necesario emplear el hueco y se tendrá la densidad del material compactado.

Una vez terminada la operación, se saca el aceite por medio de una bomba pequeña de succión. Si se desea, puede utilizarse el mismo aceite en diferentes hoyos. Cuando terreno sea arenoso no debe emplearse este método. (Valle Rodas,1963)

2.10.9 Método para determinar la densidad mediante cono de arena

2.10.9.1 Normativa

Verificación del peso unitario del suelo, Método del cono de arena (ASTM D1556 - AASHTO T191)

Este método establece un procedimiento para determinar la densidad de suelos cuyo tamaño máximo absoluto de partículas sea menor o igual a 50 mm (2”) en un caso y menor o igual a 150 mm (6”) en el otro.

El cono convencional es un aparato medidor de volumen, provisto de una válvula cilíndrica de 12,5 mm de abertura, que controla el llenado de un cono de 6” de diámetro y 60° de ángulo basal. Un extremo termina en forma de embudo y su otro extremo se ajusta a la boca de un recipiente de aproximadamente 5l de capacidad. La válvula debe de tener topes y también llevar una placa base.

2.3.1.1.Equipos y Materiales

- Cono metálico con placa
- Envase de plástico con cono
- Mazo de 4lb
- Cíncel
- Balanza de 0,1gr y 0,01gr. de aproximación.
- Arena calibrada

2.3.1.2. Procedimiento

- Se realizó la calibración del frasco, para obtener el volumen del equipo hasta la llave de paso.
- Calibración de la arena de El Saire, para esto debe estar limpia y tener una granulometría entre los tamices N°16 y N°30. También se determinó la densidad de la arena. La diferencia entre el peso del equipo lleno de arena y después de llenar el cono, nos proporciona el peso de arena disponible en el cono.
- Se prepara la superficie, esta debe estar limpia y nivelada, posteriormente se instaló la placa, ajustándola con la ayuda de clavos.
- Se procede a excavar un hoyo de profundidad entre los 10cm y 20cm.
- El material que se extrae es guardado sin que se pierda la humedad, para poder determinar el peso húmedo del suelo.
- Se ajusta la llave de paso, se vuelca el frasco sobre la placa y se abre la llave para dejar caer la arena hasta que el hueco y el cono se llenen.
- Recuperar la arena que queda en el hoyo para su posterior limpieza.

2.10.10 Método para determinar la Densidad mediante densímetro nuclear

2.10.10.1 Normativa

Peso unitario del suelo y del suelo-agregado en el terreno mediante métodos nucleares (ASTM 2922 - AASHTO T238)

Este método se refiere a la determinación en el terreno de la densidad total de un suelo con fines de investigación, control o diseño, colocando una fuente emisora y detector de rayos gamma, sobre o dentro del material, o adyacente al mismo. Se aplica hasta profundidades entre 50 mm y 300 mm (2" y 12").

Para la calibración y operación del equipo, así como el procedimiento de ensayo, deberán tenerse en cuenta las recomendaciones del fabricante del equipo.

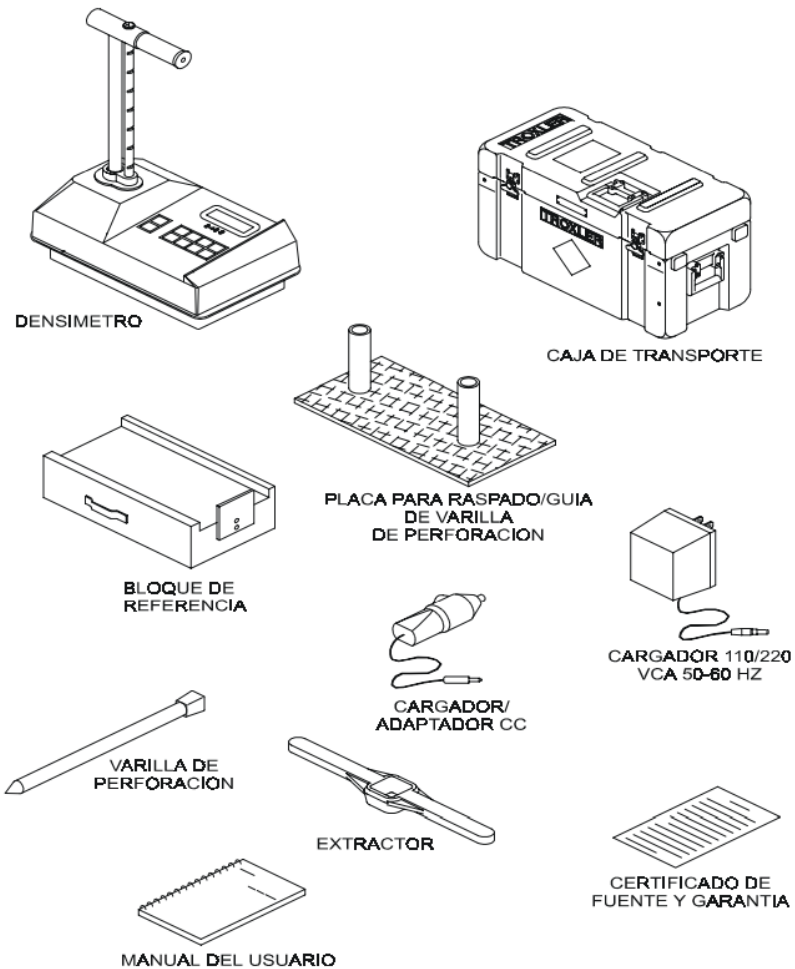
2.10.10.2 Densímetro Troxler 3430

El densímetro Troxler 3430 determina la densidad por medio de transmisión directa o retro dispersada de los rayos gamma, cuantificando el número de fotones emitidos por una fuente de Cesio-137. Los detectores GM (Geiger y Müller) ubicados en la base del

medidor detectan los rayos gamma y un microprocesador convierte los conteos en una medida de densidad.

2.10.10.3 Partes y accesorios

Figura 2.16 Partes del densímetro nuclear



Fuente Manual del usuario Densímetro para medición de humedad-densidad

- **El densímetro;** es un instrumento portátil que contiene los módulos electrónicos, bloques de baterías recargables, detectores y fuentes radioactivas.
- **Bloque de referencia;** proporciona un material que sirve de referencia constante para efectuar los ajustes en la sonda, los cuales son necesarios para compensar la desintegración progresiva de la fuente.

- **Placa para alisado/guía de la varilla de perforación;** se utiliza para preparar el terreno de emplazamiento, o la porción de tierra la cual se va a colocar el equipo y para guiar la varilla al hacer la perforación.
- **La varilla de perforación;** se utiliza para preparar un orificio cuando se va efectuar una medición de transmisión directa.
- **Dos cargadores/adaptadores;** uno para CC (12VCC) y otro para CA (115/230 VCA 50/60 Hz.)
- **Una caja para la batería de repuesto;** está incluida para uso con baterías alcalinas.
- **La caja de transporte;** es un contenedor diseñado para el transporte de la sonda y sus partes asociadas.
- **El extractor;** es una herramienta para sacar la varilla de perforación del material probado.

2.10.11 Preparación del terreno

- Nivelar la superficie con la placa de rapado, dirigiéndola hacia adelante y atrás, evitando así huecos y desigualdades de la superficie.

Figura 2.17 Nivelación de superficie con la placa



Fuente: Elaboración propia

- Una vez nivelada la superficie, se procede a introducir la varilla a la profundidad deseada, se procede a marcar el contorno de la placa, antes de retirar la varilla.

Figura 2.18 Varilla de perforación



Fuente: Elaboración propia

- Retiramos la varilla con cuidado en línea recta hacia arriba, al mismo tiempo girando hacia los lados, retiramos la placa de raspado y colocamos la sonda sobre la misma superficie. Introducimos la varilla con la fuente en el orificio creado por la varilla de perforación.

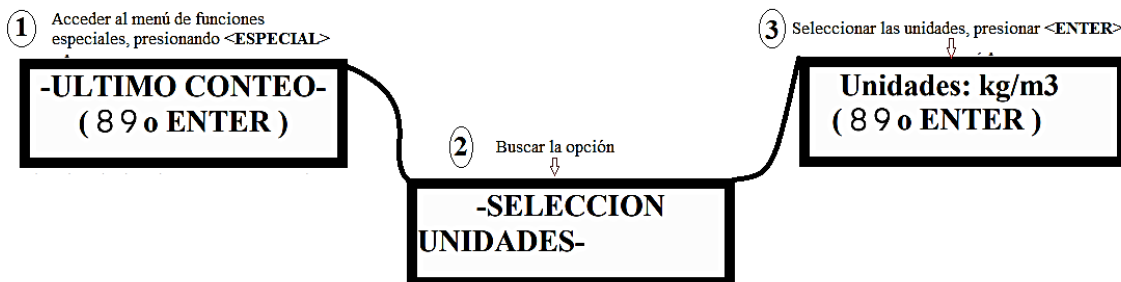
Figura 2.19 Introducción de varilla y la fuente



Fuente: Elaboración propia

2.10.12 Configuración de los parámetros

- Selección de las unidades de medida



- Selección del tiempo de conteo

Presionar <PERIODO> para mostrar en la pantalla:

Período xx Seg.
(8 9 o ENTER)

Las flechas hacia arriba y hacia abajo pueden ser utilizadas para desplazarse por los tiempos de conteo disponibles. Para seleccionar el tiempo de conteo visualizado, presione <ENTER>.

- Selección de la profundidad

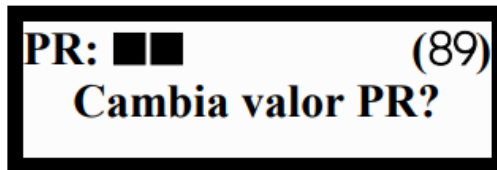
Para cambiar la profundidad a la cual se va hacer la medición, presione <PROFUNDIDAD>.

Prof: RETRODISP
(8 9 a cambiar)

Las flechas hacia arriba y hacia abajo pueden ser utilizadas para desplazarse por las profundidades disponibles. Para seleccionar la profundidad de la medición visualizada, presione <ENTER>

- **Introducción del valor de Proctor**

Introducir el valor de la densidad máxima, la pantalla nos muestra



Para intercambiar el valor de Proctor utilizar las flechas.

Para activar el valor en la pantalla, presione <NO>.

Para cambiar el valor visualizado, presione <SI>. El primer dígito del valor destallara. Utilizar las flechas para desplazarse por las entradas posibles (0-9).

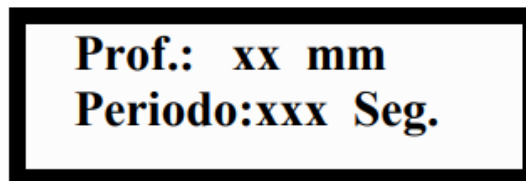
Cuando este visualizado el valor correcto para ese dígito, presione <ENTER>.

Luego se resaltará con luz intermitente al próximo dígito a la derecha y así hasta el dígito final.

- **Forma de realizar una medición**

Coloque la sonda sobre el emplazamiento. Libere el mango y empújelo hacia abajo hasta alcanzar la posición correcta. Verifique que la clavija se enganche con la muesca en la varilla indicadora.

Presione <COMENZAR>



Una vez expirado el tiempo de conteo, la pantalla muestra:

Densidad húmeda



Densidad seca y porcentaje % de Proctor

Ds: xxxxx kg/m³
% PR: xxxxx %

Humedad y % de humedad

Hum.: xxxxx kg/m³
% Hum.: xxxx %

Huecos de aire y relación de huecos

Hueco A: xxxx %
Relac Hue: xxxx

2.11 Estadística

La estadística es el método que permite organizar, sintetizar, presentar, analizar, cuantificar e interpretar gran cantidad de datos, de tal forma que se puedan tomar decisiones, realizar generalizaciones y obtener conclusiones válidas acerca de los fenómenos o líneas de investigación de estudios. (Rodríguez,2020)

Se divide en dos grandes ramas, estadística descriptiva y estadística inferencial.

2.11.1 Estadística descriptiva

Esta rama de la estadística se encarga de obtener, organizar, presentar y describir los datos mediante la aplicación de métodos y técnicas. Lo anterior se aplica de manera exclusiva a los datos que constituyen una muestra, la cual permitirá inferir o generalizar acerca de la totalidad de los elementos que conforman la población en estudio, siempre y cuando dicha muestra sea representativa. El resumen de los datos puede realizarse en forma tabular, gráfica o numérica. (Rodríguez,2020)

- **Media**

Para un conjunto dado de números x_1, x_2, \dots, x_n , la medida más conocida y útil del centro es la media o promedio aritmético del conjunto. Como casi siempre se pensará que los números x , constituyen una muestra, a menudo se hará referencia al promedio aritmético como la media muestral y se la denota \bar{x} .

- **Rango**

Es la diferencia entre valores de muestra grande y pequeños representado por valores numéricos.

Para Havbro (2012), el rango es la propagación dispersión o variabilidad de una población en el contorno del promedio de una muestra se caracteriza por la varianza:

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

La desviación S es la desviación estándar de una muestra:

$$S = \sqrt{s^2}$$

Donde:

$S^2 = \text{Varianza}$

- **Desviación estándar**

Nos indica que tan alejados se encuentran cada uno de los datos del promedio, cuando la desviación estándar es más alta, más alta será la dispersión de los datos o más alejado del promedio se encontrará. (Minitab18,2019)

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

- **Hipótesis estadística**

Es una pretensión o aseveración sobre el valor de un solo parámetro (característica de una población o característica de una distribución de probabilidad), sobre los valores de varios parámetros o sobre la forma de una distribución de probabilidad completa.

La **hipótesis nula** denotada H_0 , es la pretensión de que inicialmente se supone cierta. La **hipótesis alternativa** denotada por H_a , es la aseveración contradictoria a H_0 .

La hipótesis nula será rechazada en favor de la hipótesis alternativa solo si la evidencia muestral sugiere que H_0 es falsa. Si la muestra no contradice fuertemente a H_0 se continuará creyendo en la verdad de la hipótesis nula. Las dos posibles conclusiones derivadas de un análisis de un análisis de prueba de hipótesis son entonces rechazar H_0 o no rechazar H_0 . (Devore,2008)

- **Prueba de correlación Pearson**

Es una prueba que mide la relación estadística entre dos variables continuas. Si la asociación entre los elementos no es lineal, entonces el coeficiente no se encuentra representado adecuadamente. El coeficiente de correlación puede tomar un rango de valores de +1 a -1.

Un valor de 0 indica que no hay asociación entre las dos variables. Un valor mayor que 0 indica una asociación positiva. Es decir, a medida que aumenta el valor de una variable, también lo hace el valor de la otra. Un valor menor que 0 indica una asociación negativa; es decir, a medida que aumenta el valor de una variable el valor de la otra disminuye.

Tabla 2.6 Coeficientes de correlación de Pearson.

+0,96	+1	Perfecta
+0,85	+0,95	Fuerte
+0,7	+0,84	Significativa
+0,5	+0,69	Moderada
+0,2	+0,49	Débil
+0,1	+0,19	Muy débil
0	0	Nula
-0,1	-0,19	Muy débil
-0,2	-0,49	Débil
-0,5	-0,69	Moderada
-0,7	-0,84	Significativa
-0,85	-0,95	Fuerte
-0,96	-1	Perfecta

Fuente: Prof. Pedro Beltrán

CAPÍTULO III
DESARROLLO
EXPERIMENTAL

CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Ubicación del proyecto

La zona de estudio se encuentra sobre la construcción de la segunda Circunvalación de la Provincia Cercado del departamento de Tarija. Se seleccionó la segunda Circunvalación ya que presenta una subrasante natural la misma que no cuenta con otros trabajos, existen tramos con material granular los mismos que fueron descartados tomando en cuenta solo los que presentaban las características requeridas para el proyecto.

Figura 3.1 Zona de estudio



Fuente: Google Earth

Figura 3.2 Subrasante Segunda Circunvalación



Fuente: Elaboración propia

La selección de las muestras fue de manera aleatoria intencional, los puntos considerados son los siguientes:

Tabla 3.1 Puntos de Extracción

Punto	Latitud	Longitud
Punto 1	21°30'34,5"S	64°42'18,3" W
Punto 2	21°30'33,7"S	64°42'19,7" W
Punto 3	21°30'33"S	64°42'21,1" W
Punto 4	21°30'30,4"S	64°42'27,8" W
Punto 5	21°30'27,1"S	64°42'34,5" W
Punto 6	21°30'26,2"S	64°42'36,6" W
Punto 7	21°30'25,7"S	64°42'37,6" W
Punto 8	21°30'25,6"S	64°42'39" W
Punto 9	21°30'24,6"S	64°42'40,4" W
Punto 10	21°30'24,1"S	64°42'42,5" W
Punto 11	21°30'23,8"S	64°42'44,6" W
Punto 12	21°30'23,4"S	64°42'46,2" W
Punto 13	21°30'23"S	64°42'48,1" W
Punto 14	21°30'22,7"S	64°42'49,5" W
Punto 15	21°30'22,6"S	64°42'51,6" W
Punto 16	21°30'22"S	64°42'54,1" W
Punto 17	21°30'21,7"S	64°42'57" W
Punto 18	21°30'21,4"S	64°42'59,2" W
Punto 19	21°30'20,5"S	64°43'26,1" W
Punto 20	21°30'20,2"S	64°43'28,8" W
Punto 21	21°30'20"S	64°43'30,9" W
Punto 22	21°30'19,9"S	64°43'32,7" W
Punto 23	21°30'19,6"S	64°43'34,5" W
Punto 24	21°30'19,5"S	64°43'36,5" W
Punto 25	21°30'19,1"S	64°43'38,4" W
Punto 26	21°30'18,7"S	64°43'40,4" W
Punto 27	21°30'17,9"S	64°43'42,9" W
Punto 28	21°30'17,6"S	64°43'44,7" W
Punto 29	21°30'16,9"S	64°43'45,6" W
Punto 30	21°30'17,5"S	64°43'47,7" W

Fuente: Elaboración propia

3.2 Caracterización de la zona de estudio

Las características técnicas de la zona de estudio, se trata de la segunda Circunvalación que está conformada solo de una subrasante natural, la longitud de estudio es de 2,5 km.

3.3 Caracterización de la muestra

Es importante la caracterización de la muestra, para esto se realizó diferentes ensayos de aplicación para conocer las propiedades del suelo natural.

Para esta caracterización se realizó los siguientes ensayos:

- Contenido de humedad
- Granulometría
- Límites de Atterberg
- Compactación T-99
- Densidad método cono de arena
- Densidad método densímetro nuclear.

Figura 3.3 Caracterización de la muestra



Fuente: Elaboración propia

3.3.1 Determinación del contenido de humedad del suelo (ASTM D2216)

3.3.1.1 Objeto

Este método cubre la determinación de laboratorio del contenido de humedad del suelo. El contenido de agua del material es la relación entre la masa de agua que llena los poros de una masa de suelo y la masa de las partículas sólidas de material.

Para la realización de este ensayo utilizamos el método del horno.

Figura 3.4 Ensayo contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2 Tabla resumen contenido de humedad

Tabla 3.2 Contenido de humedad

Contenido de humedad	
Punto	Humedad (%)
Punto 1	4
Punto 2	5
Punto 3	5
Punto 4	4
Punto 5	4
Punto 6	3
Punto 7	3
Punto 8	3
Punto 9	3
Punto 10	3
Punto 11	3
Punto 12	4
Punto 13	3
Punto 14	3
Punto 15	2
Punto 16	5
Punto 17	5
Punto 18	3
Punto 19	5
Punto 20	7
Punto 21	4
Punto 22	5
Punto 23	3
Punto 24	5
Punto 25	6
Punto 26	5
Punto 27	3
Punto 28	3
Punto 29	3
Punto 30	3

Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Análisis granulométrico de suelos (ASTM D422 - AASHTO T88)

3.3.2.1 Objeto

Este método permite, mediante tamizado, determinar la distribución por tamaños de partículas mayores que 0,075 mm, de una muestra de suelo.

Durante este ensayo realizamos el método del lavado.

Figura 3.5 Ensayo granulométrico por método del lavado



Fuente: Elaboración propia

3.3.2.2 Tabla resumen de granulometría

Tabla 3.3 Granulometría

Granulometría	
Punto	% que pasa del total N°200
Punto 1	92,45
Punto 2	99,65
Punto 3	98,09
Punto 4	95,90
Punto 5	93,10
Punto 6	75,48
Punto 7	91,61
Punto 8	99,92
Punto 9	83,88
Punto 10	86,29
Punto 11	80,11
Punto 12	94,68
Punto 13	84,72
Punto 14	85,54
Punto 15	90,33
Punto 16	92,13
Punto 17	99,02
Punto 18	82,91
Punto 19	98,30
Punto 20	98,81
Punto 21	99,31
Punto 22	95,98
Punto 23	99,57
Punto 24	99,43
Punto 25	98,84
Punto 26	97,60
Punto 27	77,13
Punto 28	52,42
Punto 29	86,46
Punto 30	84,73

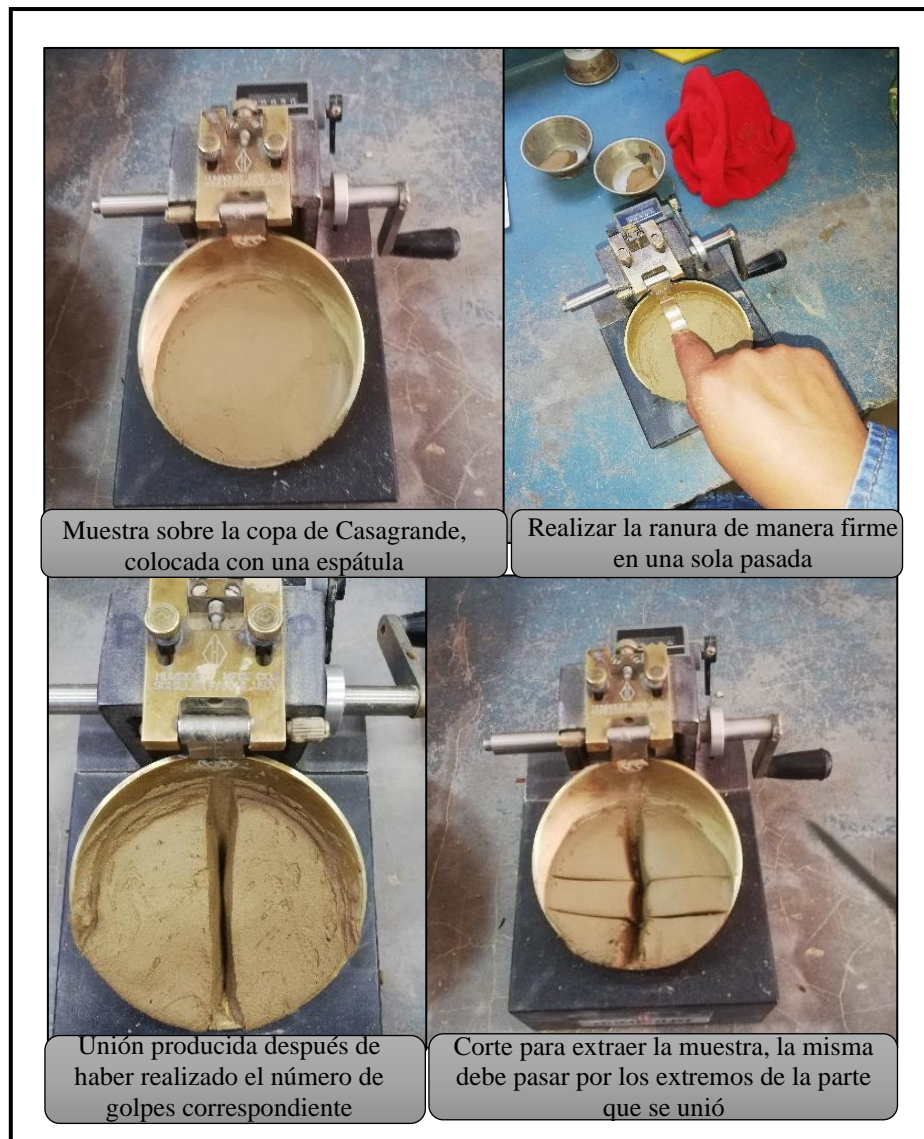
Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Determinación del límite líquido de los suelos

3.3.3.1 Objeto

Este método establece el procedimiento para determinar el límite líquido de los suelos, mediante la equipo Casagrande.

Figura 3.6 Ensayo límite líquido



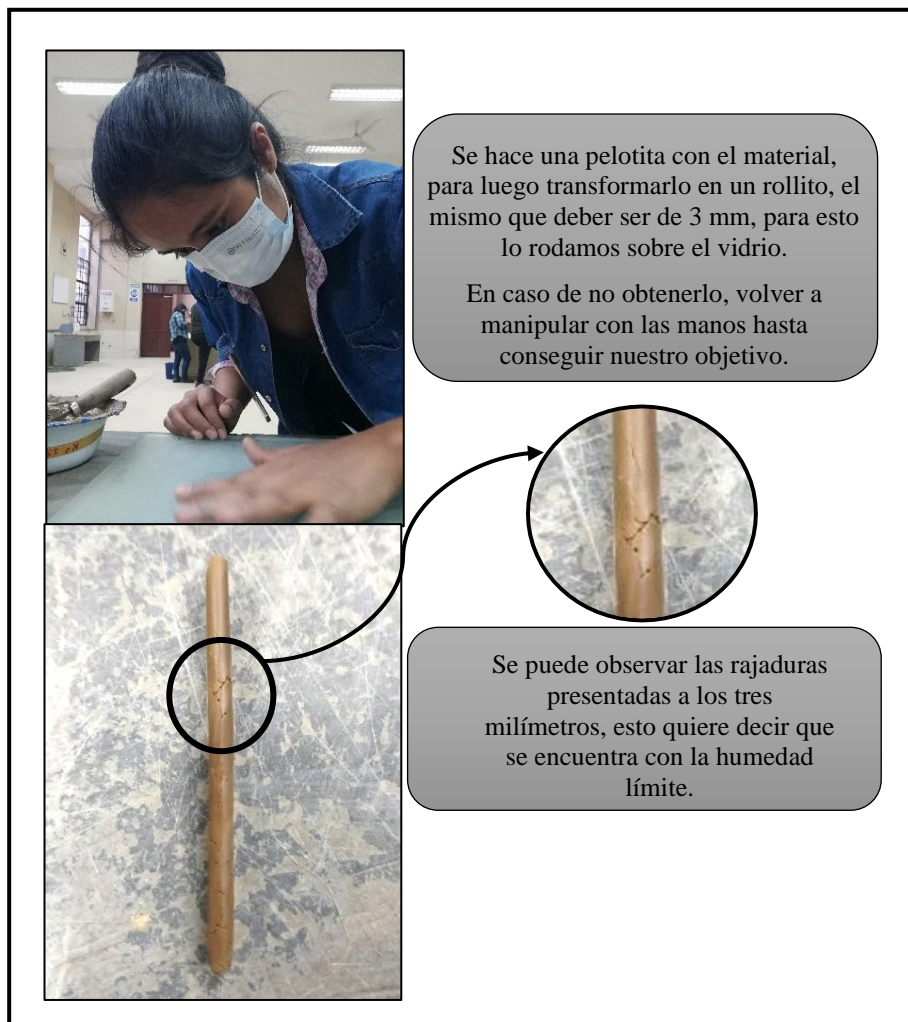
Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Determinación del límite plástico e índice de plasticidad

3.3.4.1 Objeto

Este método establece el procedimiento para determinar el límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos.

Figura 3.7 Ensayo límite plástico



Fuente: Elaboración propia

3.3.4.2 Tabla resumen Límites de Atterberg

Tabla 3.4 Límites de Atterberg

Límites de Atterberg				
Punto	LL	LP	IP	IG
Punto 1	25	16	9	8
Punto 2	38	24	15	10
Punto 3	43	24	19	12
Punto 4	34	19	15	10
Punto 5	41	26	16	11
Punto 6	33	16	17	11
Punto 7	28	20	8	8
Punto 8	50	31	18	13
Punto 9	32	21	11	8
Punto 10	29	20	9	8
Punto 11	27	17	10	8
Punto 12	37	23	14	10
Punto 13	30	20	10	8
Punto 14	34	21	13	9
Punto 15	30	17	9	8
Punto 16	29	19	10	8
Punto 17	45	28	17	12
Punto 18	30	17	12	9
Punto 19	46	26	20	13
Punto 20	35	21	14	10
Punto 21	40	24	16	10
Punto 22	35	22	13	9
Punto 23	43	26	17	11
Punto 24	44	24	20	13
Punto 25	35	17	18	11
Punto 26	35	21	14	10
Punto 27	25	17	8	8
Punto 28	25	19	6	3
Punto 29	28	19	9	8
Punto 30	23	16	7	8

Fuente: Elaboración propia

3.3.5 Clasificación de suelos (Método AASHTO)

3.3.5.1 Objeto

Clasificar los suelos en grupos de comportamientos semejantes, con propiedades geotécnicas similares.

Tabla 3.5 Clasificación AASHTO

	Caracterización del suelo				
	% Pasa N°200	LL	LP	IP	Clasificación
Punto 1	92,45	25	16	9	A-4 ₍₈₎
Punto 2	99,65	38	24	15	A-6 ₍₁₀₎
Punto 3	98,09	43	24	19	A-7 ₍₁₂₎
Punto 4	95,9	34	19	15	A-6 ₍₁₀₎
Punto 5	93,1	41	26	16	A-7 ₍₁₁₎
Punto 6	75,48	33	16	17	A-6 ₍₁₁₎
Punto 7	91,61	28	20	8	A-4 ₍₈₎
Punto 8	99,92	50	31	18	A-7 ₍₁₃₎
Punto 9	83,88	32	21	11	A-6 ₍₈₎
Punto 10	86,29	29	20	9	A-4 ₍₈₎
Punto 11	80,11	27	17	10	A-4 ₍₈₎
Punto 12	94,68	37	23	14	A-6 ₍₁₀₎
Punto 13	84,72	30	20	10	A-4 ₍₈₎
Punto 14	85,54	34	21	13	A-6 ₍₉₎
Punto 15	90,33	30	17	9	A-4 ₍₈₎
Punto 16	92,13	29	19	10	A-4 ₍₈₎
Punto 17	99,02	45	28	17	A-7 ₍₁₂₎
Punto 18	82,91	30	17	12	A-6 ₍₉₎
Punto 19	98,3	46	26	20	A-7 ₍₁₃₎
Punto 20	98,81	35	21	14	A-6 ₍₁₀₎
Punto 21	99,31	40	24	16	A-6 ₍₁₀₎
Punto 22	95,98	35	22	13	A-6 ₍₉₎
Punto 23	99,57	43	26	17	A-7 ₍₁₁₎
Punto 24	99,43	44	24	20	A-7 ₍₁₃₎
Punto 25	98,84	35	17	18	A-6 ₍₁₁₎
Punto 26	97,6	35	21	14	A-6 ₍₁₀₎
Punto 27	77,13	25	17	8	A-4 ₍₈₎
Punto 28	52,42	25	19	6	A-4 ₍₃₎
Punto 29	86,46	28	19	9	A-4 ₍₈₎
Punto 30	84,73	23	16	7	A-4 ₍₈₎

Fuente: Elaboración propia

3.3.6 Relaciones de peso unitario- humedad en los suelos – método modificado

3.3.6.1 Objeto

Este método establece el procedimiento para determinar la relación entre la humedad y la densidad de un suelo, compactado en un molde normalizado, mediante un pisón de 4,5 kg. En caída libre, desde una altura de 460 mm.

Figura 3.8 Ensayo de compactación T-99



Fuente: Elaboración propia

3.3.6.2 Tabla resumen de compactación T-99

Tabla 3.6 Compactación T-99

Compactación		
	Densidad Máx. (gr/cm³)	Humedad Ópt. (%)
Punto 1	1,93	12
Punto 2	1,76	17
Punto 3	1,76	15
Punto 4	1,89	13
Punto 5	1,84	14
Punto 6	1,92	12
Punto 7	1,87	12
Punto 8	1,67	17
Punto 9	1,94	11
Punto 10	1,89	12
Punto 11	1,95	8
Punto 12	1,78	14
Punto 13	1,87	13
Punto 14	1,85	14
Punto 15	1,89	13
Punto 16	1,87	14
Punto 17	1,64	16
Punto 18	1,94	11
Punto 19	1,73	17
Punto 20	1,74	15
Punto 21	1,72	15
Punto 22	1,82	14
Punto 23	1,68	17
Punto 24	1,76	15
Punto 25	1,72	18
Punto 26	1,76	14
Punto 27	2,00	11
Punto 28	2,01	10
Punto 29	1,89	12
Punto 30	1,97	12

Fuente: Elaboración propia

3.3.7 Método cono de arena (ASTM D1556 - AASHTO T191)

3.3.7.1 Objeto

Este método establece un procedimiento para determinar en terreno la densidad de suelos cuyo tamaño máximo absoluto de partículas sea menor o igual a 50 mm (2") en un caso y un menor o igual a 150 mm (6") en el otro.

Figura 3.9 Ensayo cono de arena



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.10 Ensayo cono de arena



Fuente: Elaboración propia

3.3.7.2 Tabla resumen ensayo cono de arena

Tabla 3.7 Densidad seca cono de arena

	Densidad Seca (gr/cm³)	Humedad (%)
Punto 1	1,48	9
Punto 2	1,60	9
Punto 3	1,50	11
Punto 4	1,59	8
Punto 5	1,58	11
Punto 6	1,70	11
Punto 7	1,64	10
Punto 8	1,48	11
Punto 9	1,64	11
Punto 10	1,61	12
Punto 11	1,80	11
Punto 12	1,70	12
Punto 13	1,59	8
Punto 14	1,62	9
Punto 15	1,64	5
Punto 16	1,62	7
Punto 17	1,56	10
Punto 18	1,63	10
Punto 19	1,66	6
Punto 20	1,60	8
Punto 21	1,55	5
Punto 22	1,49	9
Punto 23	1,64	6
Punto 24	1,64	10
Punto 25	1,58	9
Punto 26	1,72	7
Punto 27	1,75	7
Punto 28	1,70	8
Punto 29	1,67	8
Punto 30	1,60	12

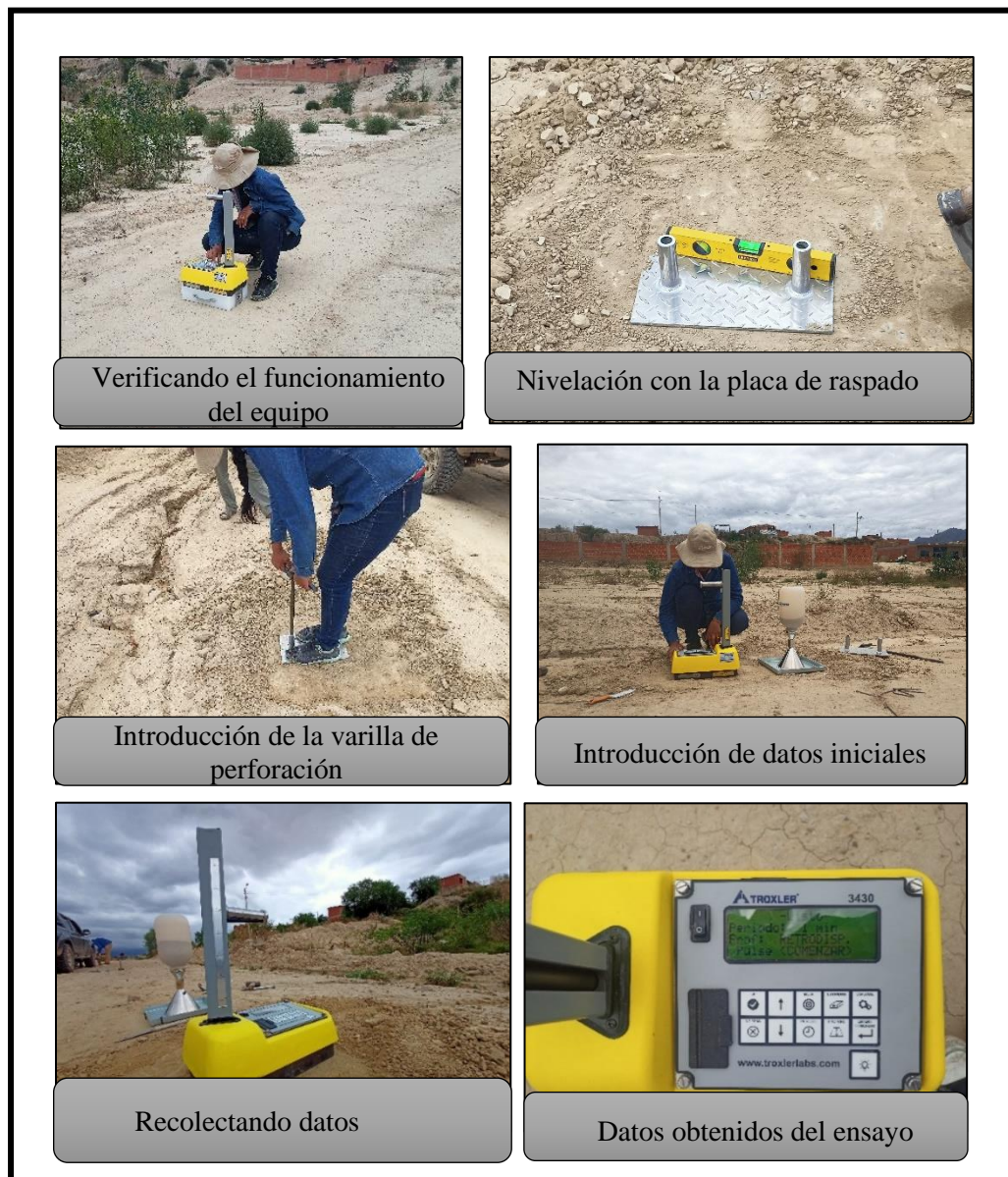
Fuente: Elaboración propia

3.3.8 Método densímetro nuclear (ASTM 2922 - AASHTO T238)

3.3.8.1 Objeto

Este método se refiere a la determinación en el terreno de la densidad del suelo, colocando una fuente emisora y un detector de rayos gamma, sobre o dentro del material, o adyacente al mismo. Los métodos nucleares pueden aplicarse hasta profundidades entre 50 mm y 300 mm.

Figura 3.11 Ensayo densímetro nuclear



Fuente: Elaboración propia

3.3.8.2 Tabla resumen densímetro nuclear

Tabla 3.8 Densidad seca densímetro nuclear

Punto	Densidad Seca (gr/cm³)	Humedad (%)
Punto 1	1,47	9
Punto 2	1,53	7
Punto 3	1,50	11
Punto 4	1,56	8
Punto 5	1,54	11
Punto 6	1,69	10
Punto 7	1,61	11
Punto 8	1,45	12
Punto 9	1,59	11
Punto 10	1,62	12
Punto 11	1,81	10
Punto 12	1,65	14
Punto 13	1,61	9
Punto 14	1,58	9
Punto 15	1,57	8
Punto 16	1,59	9
Punto 17	1,55	10
Punto 18	1,59	9
Punto 19	1,62	7
Punto 20	1,52	5
Punto 21	1,50	6
Punto 22	1,48	8
Punto 23	1,61	7
Punto 24	1,60	7
Punto 25	1,54	9
Punto 26	1,73	5
Punto 27	1,77	8
Punto 28	1,72	8
Punto 29	1,58	8
Punto 30	1,55	12

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS DE
RESULTADOS Y
COMPARACIÓN

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y COMPARACIÓN

4.1 Introducción

La presentación de resultados obtenidos de los ensayos realizados cono de arena y densímetro nuclear en la subrasante de la Segunda Circunvalación; da lugar para realizar la comparación requerida entre cada uno de los ensayos cono de arena y densímetro nuclear teniendo como ensayo patrón el cono de arena, para la aprobación de esta investigación.

4.2 Correlación de densidades secas

Se realizaron correlaciones entre la densidad seca obtenida entre los ensayos cono de arena y densímetro nuclear para así definir el grado de asociación que se tiene entre ambos métodos.

Dicha correlación nos sirvió para realizar los respectivos análisis y comparaciones.

4.2.1 Correlación de Pearson

El Coeficiente de Correlación de Pearson es una medida de la correspondencia o relación lineal entre dos variables cuantitativas aleatorias. Es decir, se puede definir como un índice utilizado para medir el grado de relación que tienen dos variables, ambas cuantitativas.

Teniendo dos variables, la correlación facilita que se hagan estimaciones del valor de una de ellas, con conocimiento del valor de la otra variable.

Este coeficiente es una medida que indica la situación relativa de los sucesos respecto a las dos variables, es decir, representa la expresión numérica que indica el grado de correspondencia o relación que existe entre las 2 variables. Estos números varían entre límites de +1 y -1.

Su dimensión indica el nivel de asociación entre las variables.

4.3 Tabla resumen

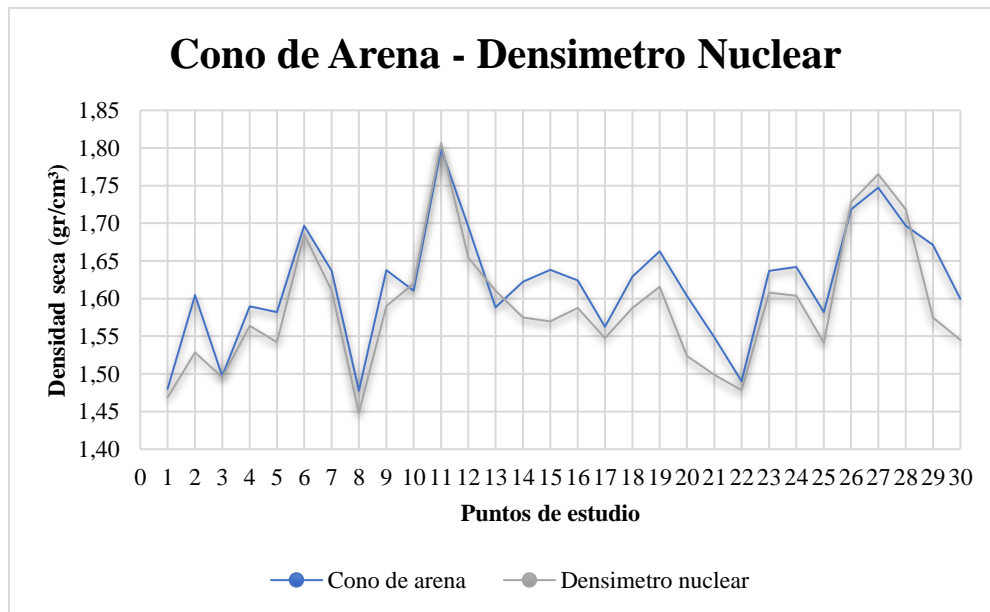
Tabla 4.1 Tabla resumen

	Caracterización del suelo					Compactación		Cono de arena			Densímetro nuclear		
	% Pasa N°200	LL	LP	IP	Clasificación	Densidad Max (gr/cm ³)	Humedad Opt (%)	Densidad Seca (gr/cm ³)	Humedad (%)	GC (%)	Densidad Seca (gr/cm ³)	Humedad (%)	GC (%)
Punto 1	92,45	25	16	9	A-4 ₍₈₎	1,93	12	1,48	9	77	1,47	9	76
Punto 2	99,65	38	24	15	A-6 ₍₁₀₎	1,76	17	1,60	9	91	1,53	7	87
Punto 3	98,09	43	24	19	A-7 ₍₁₂₎	1,76	15	1,50	11	85	1,50	11	85
Punto 4	95,9	34	19	15	A-6 ₍₁₀₎	1,89	13	1,59	8	84	1,56	8	83
Punto 5	93,1	41	26	16	A-7 ₍₁₁₎	1,84	14	1,58	11	86	1,54	11	84
Punto 6	75,48	33	16	17	A-6 ₍₁₁₎	1,92	12	1,70	11	88	1,69	10	88
Punto 7	91,61	28	20	8	A-4 ₍₈₎	1,87	12	1,64	10	88	1,61	11	86
Punto 8	99,92	50	31	18	A-7 ₍₁₃₎	1,67	17	1,48	11	88	1,45	12	87
Punto 9	83,88	32	21	11	A-6 ₍₈₎	1,94	11	1,64	11	84	1,59	11	82
Punto 10	86,29	29	20	9	A-4 ₍₈₎	1,89	12	1,61	12	85	1,62	12	86
Punto 11	80,11	27	17	10	A-4 ₍₈₎	1,95	8	1,80	11	92	1,81	10	93
Punto 12	94,68	37	23	14	A-6 ₍₁₀₎	1,78	14	1,70	12	95	1,65	14	93
Punto 13	84,72	30	20	10	A-4 ₍₈₎	1,87	13	1,59	8	85	1,61	9	86
Punto 14	85,54	34	21	13	A-6 ₍₉₎	1,85	14	1,62	9	88	1,58	9	85
Punto 15	90,33	30	17	9	A-4 ₍₈₎	1,89	13	1,64	5	87	1,57	8	83
Punto 16	92,13	29	19	10	A-4 ₍₈₎	1,87	14	1,62	9	87	1,59	9	85
Punto 17	99,02	45	28	17	A-7 ₍₁₂₎	1,64	16	1,56	10	95	1,55	10	94
Punto 18	82,91	30	17	12	A-6 ₍₉₎	1,94	11	1,63	10	84	1,59	9	82
Punto 19	98,3	46	26	20	A-7 ₍₁₃₎	1,73	17	1,66	6	96	1,62	7	93
Punto 20	98,81	35	21	14	A-6 ₍₁₀₎	1,74	15	1,60	8	92	1,52	5	88
Punto 21	99,31	40	24	16	A-6 ₍₁₀₎	1,72	15	1,55	5	90	1,50	6	87
Punto 22	95,98	35	22	13	A-6 ₍₉₎	1,82	14	1,49	9	82	1,48	8	81
Punto 23	99,57	43	26	17	A-7 ₍₁₁₎	1,68	17	1,64	6	97	1,61	7	96
Punto 24	99,43	44	24	20	A-7 ₍₁₃₎	1,76	15	1,64	10	93	1,60	7	91
Punto 25	98,84	35	17	18	A-6 ₍₁₁₎	1,72	18	1,58	9	92	1,54	9	90
Punto 26	97,6	35	21	14	A-6 ₍₁₀₎	1,76	14	1,72	7	98	1,73	5	98
Punto 27	77,13	25	17	8	A-4 ₍₈₎	2,00	11	1,75	7	87	1,77	8	88
Punto 28	52,42	25	19	6	A-4 ₍₃₎	2,01	10	1,70	8	84	1,72	8	85
Punto 29	86,46	28	19	9	A-4 ₍₈₎	1,89	12	1,67	8	88	1,58	8	83
Punto 30	84,73	23	16	7	A-4 ₍₈₎	1,97	12	1,60	12	81	1,55	12	78

Fuente: Elaboración propia

4.4 Comparación de densidad seca

Gráfica 4.1 Densidad seca cono de arena y densímetro nuclear

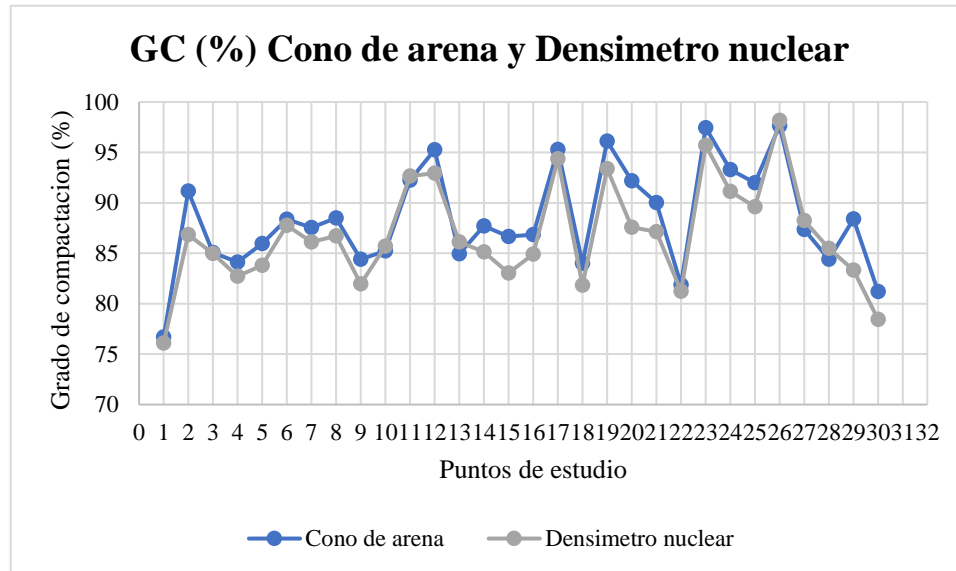


Fuente: Elaboración propia

La gráfica muestra las densidades secas máximas obtenidas a través de los ensayos realizados con el cono de arena y el densímetro nuclear, se puede evidenciar que tienen la misma tendencia sin embargo en la parte central se logra evidenciar que no existe la misma tendencia marcada entre los demás puntos, esto se debe a las características del suelo ya que en los puntos 13 al 16 el suelo presentaba ciertas cantidades de suelo granular.

4.5 Comparación grado de compactación

Gráfica 4.2 Comparación grado de compactación

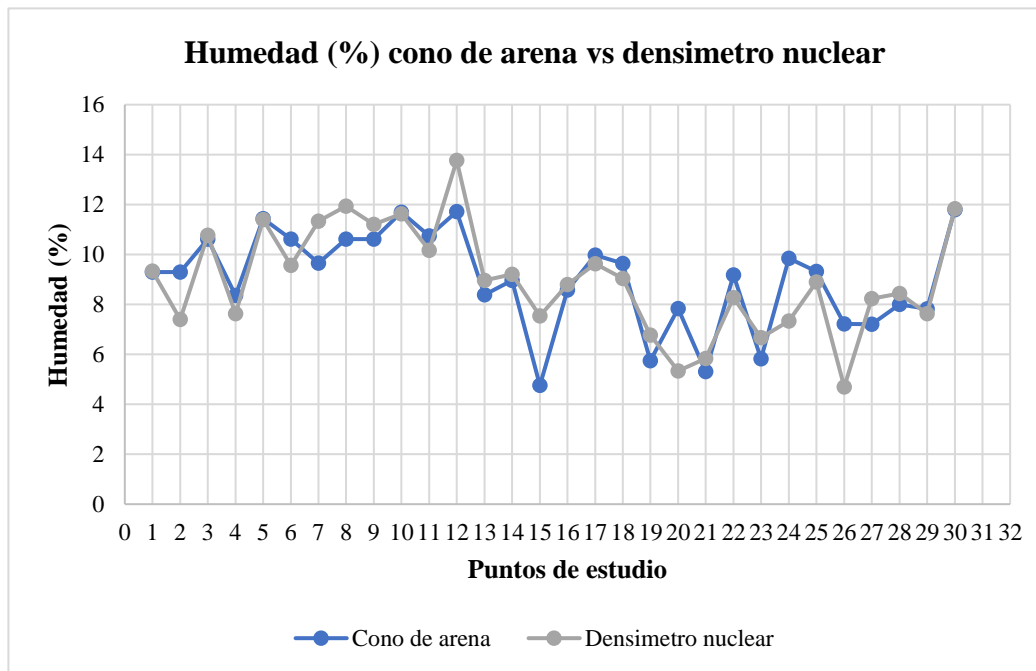


Fuente: Elaboración propia

Esta gráfica nos muestra el grado de compactación que se obtiene de los ensayos tanto cono de arena como del densímetro nuclear se observa que se sigue una misma tendencia en los datos obtenidos en este caso son muy pocos los puntos que se pueden evidenciar que no continúan con la tendencia marcada.

4.6 Comparación de humedad (%)

Gráfica 4.3 Comparación de humedad (%)



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se puede observar la comparación realizada entre la humedad (%) obtenida en los ensayos cono de arena y densímetro nuclear, en este caso la línea de tendencia no está muy marcada, debido que en algunos puntos la humedad obtenida por el densímetro nuclear es mayor a la del cono de arena. Esto se debe a que el densímetro nuclear se basa en la medición del contenido de hidrógeno tanto en el agua como en los espacios vacíos de las partículas.

4.7 Porcentaje de variación

El porcentaje de variación se utiliza para describir la relación entre el valor de la densidad seca obtenida por el cono de arena y la obtenida por el densímetro nuclear.

$$\% \text{ de variación} = \text{error porcentual} = \frac{\text{valor aproximado} - \text{valor exacto}}{\text{valor exacto}} * 100$$

Donde:

Valor exacto = Densidad seca obtenida por el cono de arena

Valor aproximado = Densidad seca obtenida por el densímetro nuclear

El porcentaje de varianza obtenido entre las densidades secas obtenidas por los métodos cono de arena y densímetro nuclear es del -1,79% como se puede observar en la tabla 4-2.

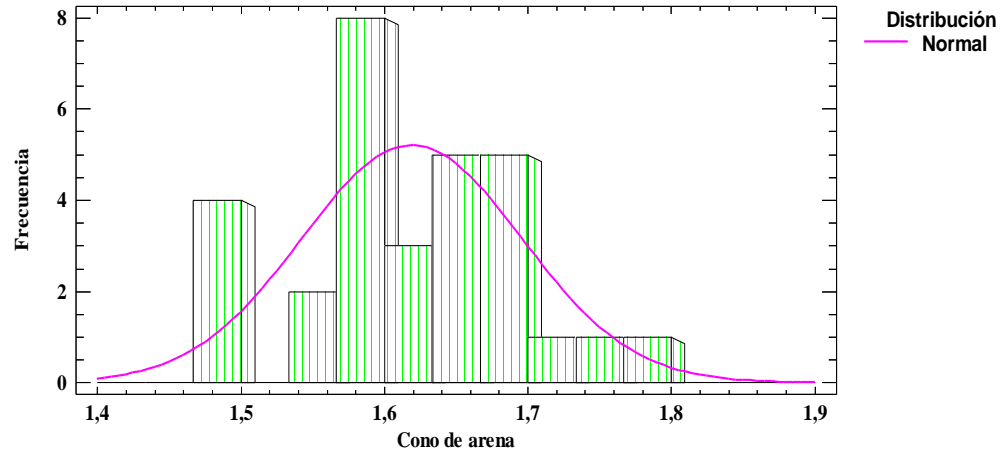
Tabla 4.2 Porcentaje de variación

Punto	Densidad seca (gr/cm³) Cono de arena	Densidad seca (gr/cm³) Densímetro nuclear	% de variación
Punto 1	1,48	1,47	-0,76
Punto 2	1,60	1,53	-4,59
Punto 3	1,50	1,50	-0,11
Punto 4	1,59	1,56	-1,68
Punto 5	1,58	1,54	-2,12
Punto 6	1,67	1,69	0,71
Punto 7	1,64	1,61	-1,63
Punto 8	1,48	1,45	-1,99
Punto 9	1,64	1,59	-2,91
Punto 10	1,61	1,62	0,58
Punto 11	1,80	1,81	0,44
Punto 12	1,70	1,65	-2,42
Punto 13	1,59	1,61	1,28
Punto 14	1,62	1,58	-2,71
Punto 15	1,64	1,57	-4,17
Punto 16	1,60	1,59	-0,71
Punto 17	1,56	1,55	-0,96
Punto 18	1,63	1,59	-2,56
Punto 19	1,66	1,62	-2,83
Punto 20	1,60	1,52	-4,98
Punto 21	1,55	1,50	-3,22
Punto 22	1,49	1,48	-1,08
Punto 23	1,64	1,61	-1,78
Punto 24	1,69	1,60	-4,89
Punto 25	1,58	1,54	-2,58
Punto 26	1,72	1,73	0,55
Punto 27	1,75	1,77	1,01
Punto 28	1,70	1,72	1,27
Punto 29	1,67	1,58	-5,75
Punto 30	1,60	1,55	-3,21
Promedio	1,62	1,59	-1,79

Fuente: Elaboración propia

4.8 Prueba de normalidad para la densidad seca (cono de arena)

Gráfica 4.4 Histograma de densidad (cono de arena)



Fuente: Software Statgraphics

Realizamos la prueba de Shapiro-Wilk la cual es aplicada para muestras menores a 50.

Tabla 4.3 Prueba de normalidad densidades cono de arena

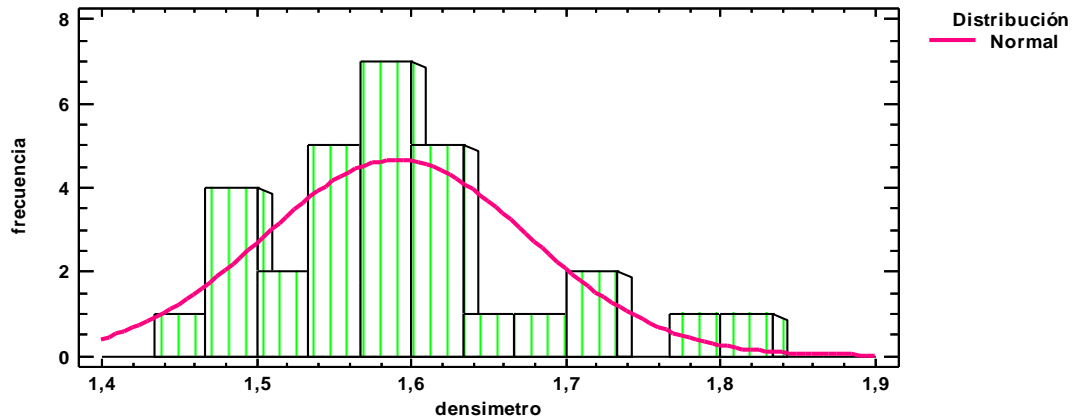
Prueba	Estadístico	Valor -P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,971195	0,616192

Fuente: Software Statgraphics

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor o igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que los datos de densidad seca obtenidos por el cono de arena provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

4.9 Prueba de normalidad para la densidad seca (Densímetro nuclear)

Gráfica 4.5 Histograma de densidad (densímetro nuclear)



Fuente: Software Statgraphics

Realizamos la prueba de Shapiro-Wilk la cual es aplicada para muestras menores a 50.

Tabla 4.4 Prueba de normalidad densidades densímetro nuclear

Prueba	Estadístico	Valor -P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,943884	0,136051

Fuente: Software Statgraphics

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor o igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que los datos de densidad seca obtenidos por el densímetro nuclear provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

4.10 Intervalos de confianza de la densidad obtenida por el cono de arena

Intervalos de confianza del 95,0% para la media: 1,62 +/- 0,0286 [1,59;1,648]

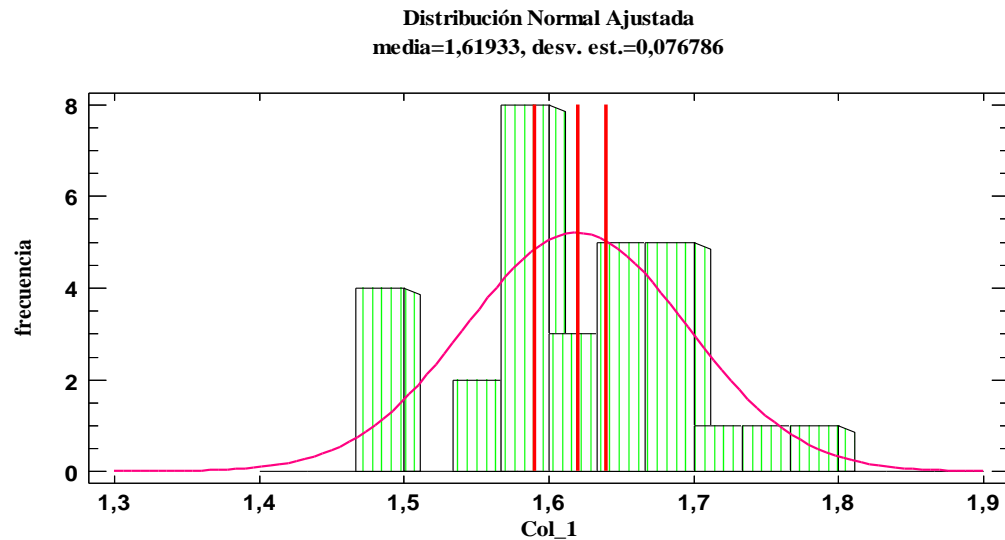
Intervalos de confianza del 95,0% para la desviación estándar: [0,061;0,103]

Ambos intervalos asumen que la población de la cual proviene la muestra puede representarse por la distribución normal. Mientras que el intervalo de confianza para la media es bastante robusto y no muy sensible a violaciones de este supuesto, los intervalos de confianza para la desviación estándar son muy sensibles

Los resultados obtenidos se basan en la siguiente fórmula que se aplica para un 95% de confianza.

$$\bar{x} \pm 1,96 * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Gráfica 4.6 Intervalos de confianza del 95%



4.11 Intervalos de confianza de la densidad obtenida por el densímetro nuclear

Intervalos de confianza del 95,0% para la media: 1,591 +/- 0,0321119 [1,559; 1,623]

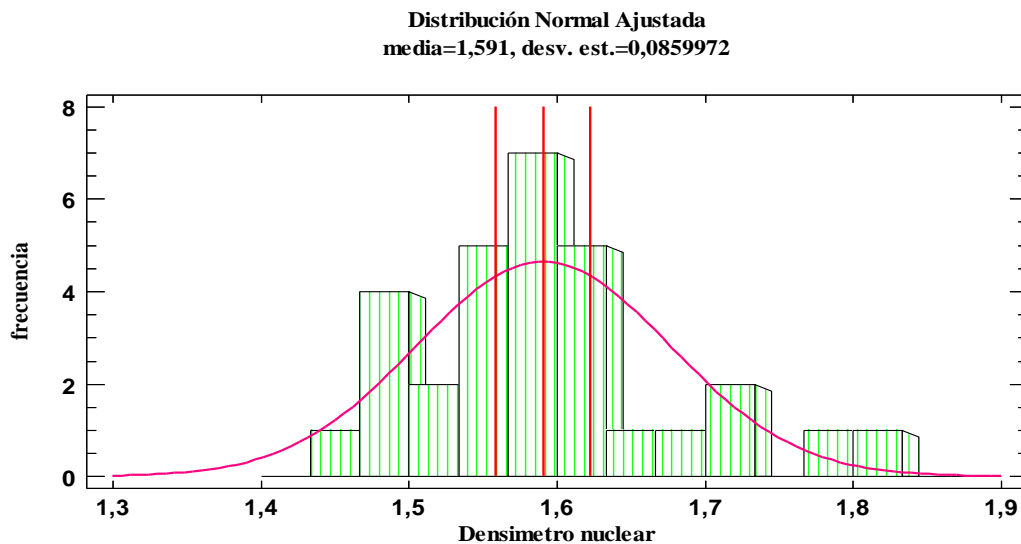
Intervalos de confianza del 95,0% para la desviación estándar: [0,068; 0,116]

Ambos intervalos asumen que la población de la cual proviene la muestra puede representarse por la distribución normal. Mientras que el intervalo de confianza para la media es bastante robusto y no muy sensible a violaciones de este supuesto, los intervalos de confianza para la desviación estándar son muy sensibles.

Los resultados obtenidos se basan en la siguiente formula que se aplica para un 95% de confianza.

$$\bar{x} \pm 1,96 * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Gráfica 4.7 Intervalos de confianza al 95%



Fuente: Software Statgraphics

4.12 Correlación de densidad seca

Tabla 4.5 Media y desviación de densidad seca

	Densidad Seca (gr/cm ³) Cono de arena	Densidad Seca (gr/cm ³) Densímetro nuclear
Punto 1	1,48	1,47
Punto 2	1,60	1,53
Punto 3	1,50	1,50
Punto 4	1,59	1,56
Punto 5	1,58	1,54
Punto 6	1,70	1,69
Punto 7	1,64	1,61
Punto 8	1,48	1,45
Punto 9	1,64	1,59
Punto 10	1,61	1,62
Punto 11	1,80	1,81
Punto 12	1,70	1,65
Punto 13	1,59	1,61
Punto 14	1,62	1,58
Punto 15	1,64	1,57
Punto 16	1,62	1,59
Punto 17	1,56	1,55
Punto 18	1,63	1,59
Punto 19	1,66	1,62
Punto 20	1,60	1,52
Punto 21	1,55	1,50
Punto 22	1,49	1,48
Punto 23	1,64	1,61
Punto 24	1,64	1,60
Punto 25	1,58	1,54
Punto 26	1,72	1,73
Punto 27	1,75	1,77
Punto 28	1,70	1,72
Punto 29	1,67	1,58
Punto 30	1,60	1,55
Media \bar{Y}	1,62	1,59
Desviación σ	0,076	0,085

Fuente: Elaboración propia

Mediante el software de Statgraphics se determinó el mejor modelo de ajuste para presentar la relación que existe entre las variables y conocer el grado de relación entre ellas.

Tabla 4.6 Modelos de ajuste

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,9484	89,94%
Log-Y Cuadrado-X	0,9463	89,54%
Inversa de Y	-0,9454	89,38%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,9448	89,27%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0,9435	89,03%
Cuadrado de X	0,9432	88,96%
Exponencial	0,9422	88,78%
Inversa-Y Log-X	-0,9414	88,63%
Raíz Cuadrada de Y	0,9403	88,41%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,9399	88,33%
Cuadrado Doble	0,9392	88,20%
Lineal	0,9381	88,00%
Raíz Cuadrada Doble	0,9377	87,92%
Multiplicativa	0,9372	87,84%
Doble Inverso	0,9365	87,71%
Raíz Cuadrada de X	0,9352	87,46%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,9348	87,38%
Cuadrado de Y	0,9331	87,06%
Logaritmo de X	0,9321	86,88%
Curva S	-0,9313	86,74%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,9296	86,42%
Cuadrado-Y Log-X	0,926	85,75%
Inversa de X	-0,9252	85,59%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,9181	84,29%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.7 Rangos de Correlación de Pearson

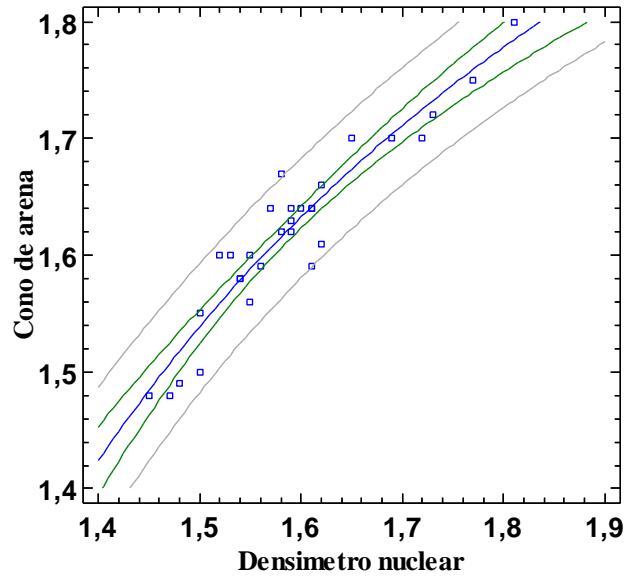
+0,96	+1	Perfecta
+0,85	+0,95	Fuerte
+0,7	+0,84	Significativa
+0,5	+0,69	Moderada
+0,2	+0,49	Débil
+0,1	+0,19	Muy débil
0	0	Nula
-0,1	-0,19	Muy débil
-0,2	-0,49	Débil
-0,5	-0,69	Moderada
-0,7	-0,84	Significativa
-0,85	-0,95	Fuerte
-0,96	-1	Perfecta

Fuente: Coeficientes de correlación de Pearson. Prof. Pedro Beltrán

Se seleccionó el modelo de ajuste **Inversa-Y, Cuadrado-X** ya que la relación que existe entre las densidades de cono de arena y densímetro nuclear es fuerte, con una correlación de -0,9484 y un R^2 de 89.94%.

4.12.1 Modelo Inversa-Y, Cuadrado-X

Gráfica 4.8 Densímetro nuclear vs cono de arena



Fuente: Software Statgraphics

$$\rho_{CA} = \sqrt{7,134 - \frac{7,149}{\rho_{DN}}}$$

Donde:

ρ_{CA} = Densidad seca cono de arena

ρ_{DN} = Densidad seca densímetro nuclear

4.13 Correlación de la humedad (%)

Mediante el software de Statgraphics se determinó el mejor modelo de ajuste para presentar la relación que existe entre las variables y conocer el grado de relación entre ellas.

Tabla 4.8 Correlación de la humedad (%)

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado Doble	0,8896	79,14%
Cuadrado de Y	0,8858	78,46%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,873	76,21%
Lineal	0,8675	75,26%
Cuadrado de X	0,8632	74,50%
Raíz Cuadrada de X	0,8589	73,77%
Raíz Cuadrada de Y	0,8528	72,73%
Cuadrado-Y Log-X	0,8525	72,67%
Raíz Cuadrada Doble	0,8464	71,63%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,8444	71,30%
Logaritmo de X	0,8425	70,99%
Exponencial	0,8341	69,56%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,8321	69,24%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,8297	68,85%
Log-Y Cuadrado-X	0,8217	67,52%
Multiplicativa	0,8177	66,86%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,7908	62,54%
Inversa de X	-0,7881	62,11%
Inversa de Y	-0,7846	61,57%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0,7844	61,53%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,7816	61,09%
Inversa-Y Log-X	-0,7766	60,32%
Curva S	-0,7713	59,48%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,7651	58,54%
Doble Inverso	0,7385	54,55%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.9 Rangos de correlación de Pearson

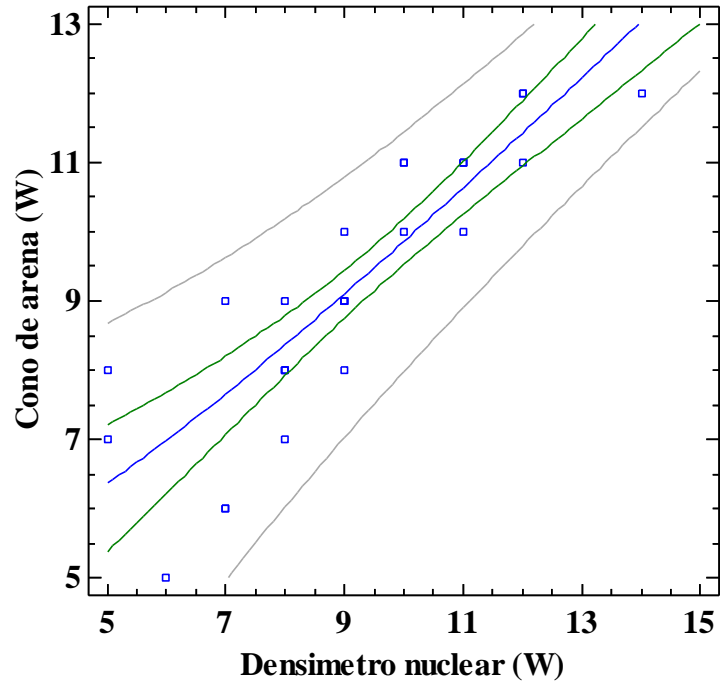
+0,96	+1	Perfecta
+0,85	+0,95	Fuerte
+0,7	+0,84	Significativa
+0,5	+0,69	Moderada
+0,2	+0,49	Débil
+0,1	+0,19	Muy débil
0	0	Nula
-0,1	-0,19	Muy débil
-0,2	-0,49	Débil
-0,5	-0,69	Moderada
-0,7	-0,84	Significativa
-0,85	-0,95	Fuerte
-0,96	-1	Perfecta

Fuente: Coeficientes de correlación de Pearson. Prof. Pedro Beltrán

Se seleccionó el modelo de ajuste **Cuadrado Doble** ya que la relación que existe entre las humedades obtenidas entre el cono de arena y densímetro nuclear es significativa, con una correlación de 0,8432 y un R^2 de 71,10%.

4.13.1 Cuadrado Doble

Gráfica 4.9 Humedad densímetro nuclear vs cono de arena



Fuente: Software Statgraphics

$$(\%) W_{CA} = \sqrt{21,624 + 0.756 * (\%)W_{DN}^2}$$

Donde:

(%) W_{DN} = Porcentaje de humedad Densímetro nuclear

(%) W_{CA} = Porcentaje de humedad Cono de arena

4.14 Depuración de datos para la densidad seca

Para realizar la depuración estadística se definió los límites de confianza tanto el límite inferior como el límite superior.

$$Lim_{inf} = \bar{X} - \sigma$$

$$Lim_{sup} = \bar{X} + \sigma$$

Donde:

\bar{X} = Media

σ = Desviación estándar

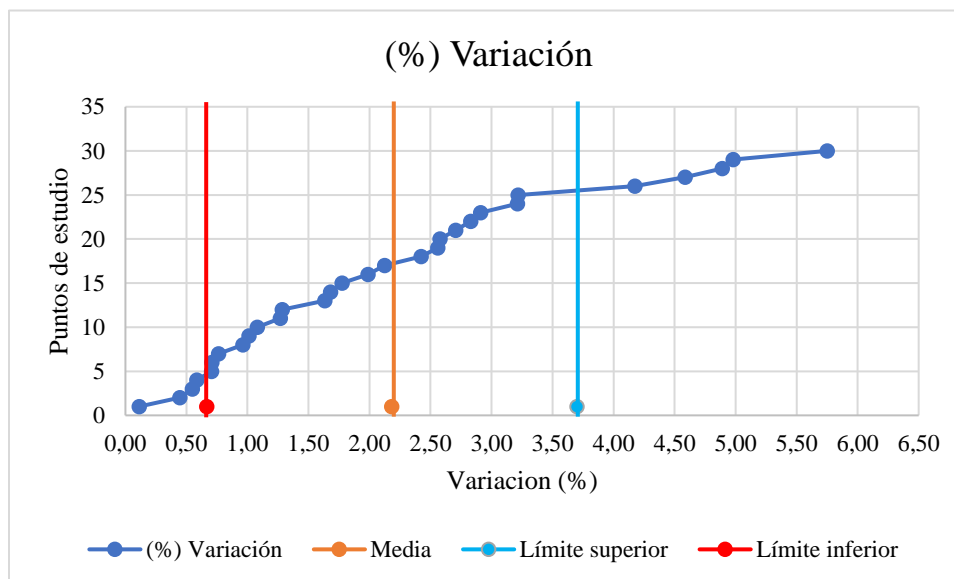
Se trabajo con los datos del porcentaje de variación obtenidos entre los resultados de densidad seca obtenidos tanto con el cono de arena y el densímetro nuclear, una vez realizado los cálculos de los límites de confianza los datos obtenidos son los siguientes:

Tabla 4.10 Límites de confianza

Media	2,18	Límite superior	3,70
Desviación	1,52	Límite inferior	0,67

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.10 Representación de los límites de confianza



Fuente: Elaboración propia

Los datos que fueron depurados son aquellos datos que se encuentran por encima del límite superior es decir por encima del 3,70% del porcentaje de variación.

Tabla 4.11 Puntos depurados

Punto	Densidad seca (g/cm³)	Densidad seca (g/cm³)	% de variación
Punto 1	1,48	1,47	0,76
Punto 2	1,60	1,53	4,59
Punto 3	1,50	1,50	0,11
Punto 4	1,59	1,56	1,68
Punto 5	1,58	1,54	2,12
Punto 6	1,67	1,69	0,71
Punto 7	1,64	1,61	1,63
Punto 8	1,48	1,45	1,99
Punto 9	1,64	1,59	2,91
Punto 10	1,61	1,62	0,58
Punto 11	1,80	1,81	0,44
Punto 12	1,70	1,65	2,42
Punto 13	1,59	1,61	1,28
Punto 14	1,62	1,58	2,71
Punto 15	1,64	1,57	4,17
Punto 16	1,60	1,59	0,71
Punto 17	1,56	1,55	0,96
Punto 18	1,63	1,59	2,56
Punto 19	1,66	1,62	2,83
Punto 20	1,60	1,52	4,98
Punto 21	1,55	1,50	3,22
Punto 22	1,49	1,48	1,08
Punto 23	1,64	1,61	1,78
Punto 24	1,69	1,60	4,89
Punto 25	1,58	1,54	2,58
Punto 26	1,72	1,73	0,55
Punto 27	1,75	1,77	1,01
Punto 28	1,70	1,72	1,27
Punto 29	1,67	1,58	5,75
Punto 30	1,60	1,55	3,21

Fuente: Elaboración propia

4.14.1 Correlación de la densidad seca entre cono de arena y densímetro nuclear

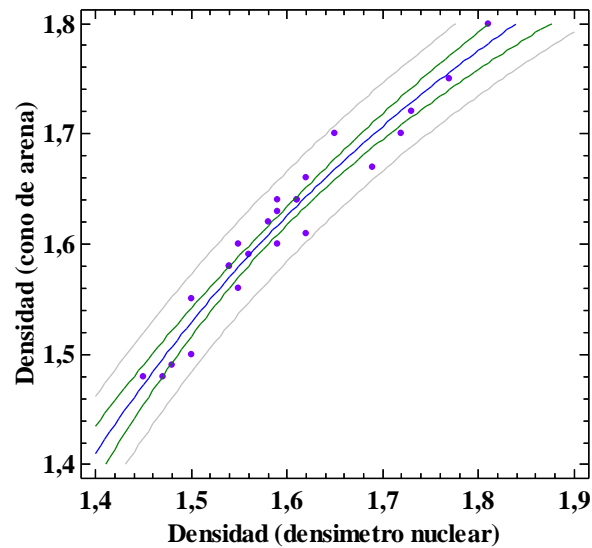
Tabla 4.12 Modelos de ajuste correlación densidad seca

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,9741	94,89%
Inversa de X	-0,9729	94,66%
Cuadrado-Y Log-X	0,9729	94,66%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,972	94,47%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,972	94,47%
Cuadrado de Y	0,9707	94,23%

Fuente: Software Statgraphics

Se seleccionó el modelo de ajuste **Cuadrado-Y Inversa de X**, ya que la relación que existe entre las densidades secas obtenidas entre el cono de arena y densímetro nuclear es fuerte, con una correlación de -0,9741 y un R^2 de 94,89%.

Gráfica 4.11 Cono de arena Vs Densímetro nuclear



Fuente: Software Statgraphics

$$\rho_{CA} = \sqrt{7,228 - \frac{7,334}{\rho_{DN}}}$$

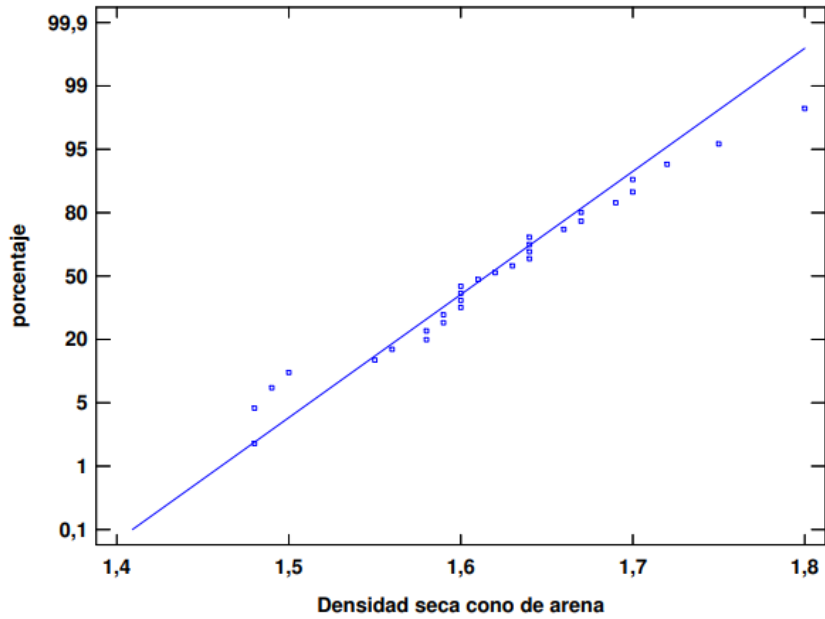
Donde:

ρ_{CA} = Densidad seca cono de arena

ρ_{DN} = Densidad seca densímetro nuclear

4.15 Resumen estadístico ensayo cono de arena

Gráfica 4.12 Probabilidad normal cono de arena



Fuente: Software Statgraphics

Tabla 4.13 Resumen estadístico cono de arena

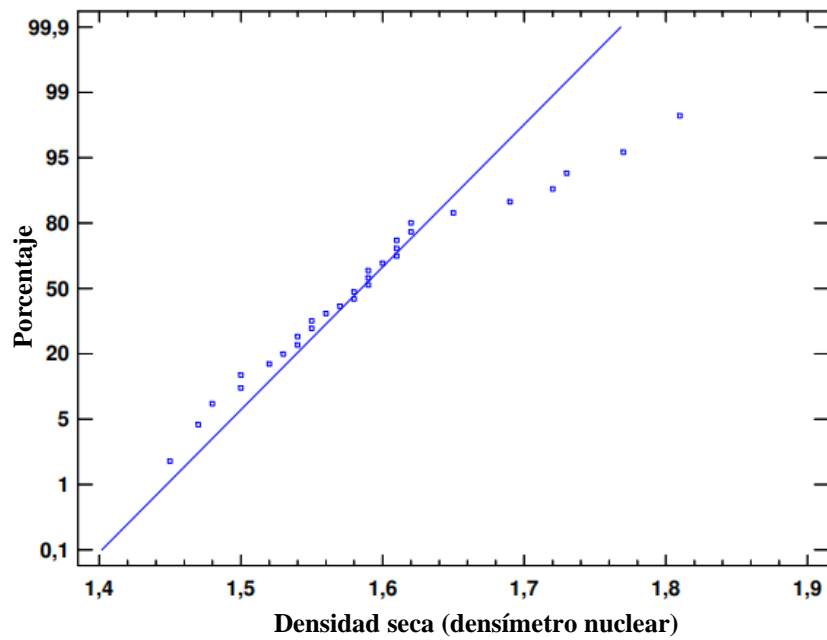
Recuento	30
Promedio	1,61933
Desviación Estándar	0,076786
Coefficiente de Variación	4,74%
Mínimo	1,48
Máximo	1,8
Rango	0,32
Sesgo Estandarizado	0,163859
Curtosis Estandarizada	0,176773

Fuente: Elaboración propia

El valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

4.16 Resumen estadístico ensayo densímetro nuclear

Gráfica 4.13 Probabilidad normal densímetro nuclear



Fuente: Software Statgraphics

Tabla 4.14 Resumen estadístico densímetro nuclear

Recuento	30
Promedio	1,591
Desviación Estándar	0,0859972
Coefficiente de Variación	5,41%
Mínimo	1,45
Máximo	1,81
Rango	0,36
Sesgo Estandarizado	1,79745
Curtosis Estandarizada	0,643642

Fuente: Elaboración propia

El valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

4.17 Comparación de la densidad seca por tipo de suelo

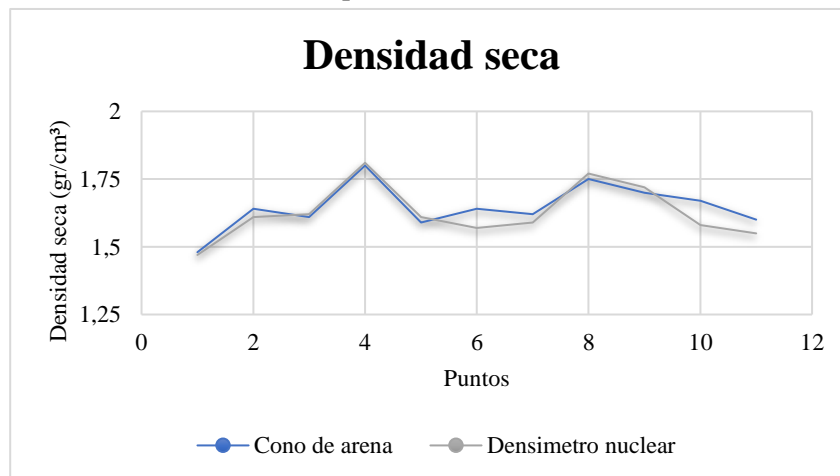
4.17.1 Densidades secas para los suelos A-4

Tabla 4.15 Densidad suelos A-4

Densidad Seca (gr/cm ³) Cono de arena	Densidad Seca (gr/cm ³) Densímetro nuclear	(%) Variación
1,48	1,47	-0,68
1,64	1,61	-1,83
1,61	1,62	0,62
1,8	1,81	0,56
1,59	1,61	1,26
1,64	1,59	-3,07
1,62	1,59	-2,11
1,75	1,77	1,02
1,70	1,72	1,27
1,67	1,58	-5,75
1,60	1,55	-3,41
1,65	1,63	-1,10

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.14 Comparación de densidades suelos A-4



Fuente: Elaboración propia

Al realizar la comparación de densidades secas en los suelos de tipo A-4 se puede observar que las mismas continúan con una misma tendencia, se puede evidenciar también que en este caso en algunos puntos la densidad obtenida por el cono de arena es mayor a la del densímetro y en otros casos sucede lo contrario.

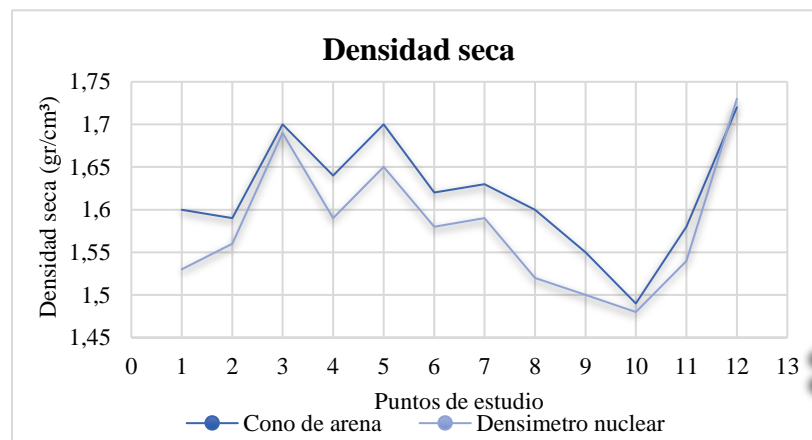
4.17.2 Densidades secas para los suelos A-6

Tabla 4.16 Densidad suelos A-6

Densidad Seca (gr/cm ³) Cono de arena	Densidad Seca (gr/cm ³) Densímetro nuclear	(%) Variación
1,6	1,53	-4,38
1,59	1,56	-1,89
1,7	1,69	-0,59
1,64	1,59	-3,05
1,7	1,65	-2,94
1,62	1,58	-2,47
1,63	1,59	-2,45
1,6	1,52	-5,00
1,55	1,5	-3,23
1,49	1,48	-0,67
1,58	1,54	-2,53
1,72	1,73	0,58
1,62	1,58	-2,38

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.15 Comparación de densidad suelos A-6



Fuente: Elaboración propia

Al realizar el análisis de las densidades secas para los suelos de tipo A-6 obtenidas por los diferentes métodos de ensayo aplicado se puede observar que los datos obtenidos por el cono son mayores a la del densímetro nuclear, así mismo se observa que las densidades obtenidas por el cono de arena se entran entre 1,49 gr/cm³ a 1,72 gr/cm³ y las densidades secas obtenidas por el densímetro nuclear se encuentran entre 1,48gr/cm³ a 1,73 gr/cm³.

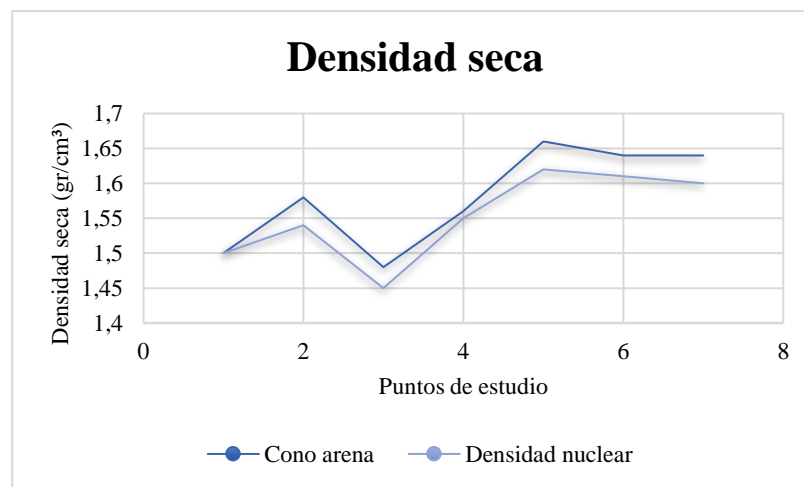
4.17.3 Densidades secas para los suelos A-7

Tabla 4.17 Densidad suelos A-7

Densidad Seca (gr/cm ³) Cono de arena	Densidad Seca (gr/cm ³) Densímetro nuclear	(%) Variación
1,5	1,5	0,00
1,58	1,54	-2,53
1,48	1,45	-2,03
1,56	1,55	-0,64
1,66	1,62	-2,41
1,64	1,61	-1,83
1,64	1,6	-2,44
1,58	1,55	-1,70

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.16 Comparación de densidad suelos A-7



Fuente: Elaboración propia

Al realizar el análisis de las densidades secas para los suelos de tipo A-6 obtenidas por los diferentes métodos de ensayo aplicado se puede observar que los datos obtenidos por el cono son mayores a la del densímetro nuclear, así mismo se observa que las densidades obtenidas por el cono de arena se entran entre 1,48 gr/cm³ a 1,66 gr/cm³ y las densidades secas obtenidas por el densímetro nuclear se encuentran entre 1,45 gr/cm³ a 1,62 gr/cm³.

4.18 Correlación de la densidad seca por tipo de suelo

4.18.1 Correlación de la densidad de los suelos A-4

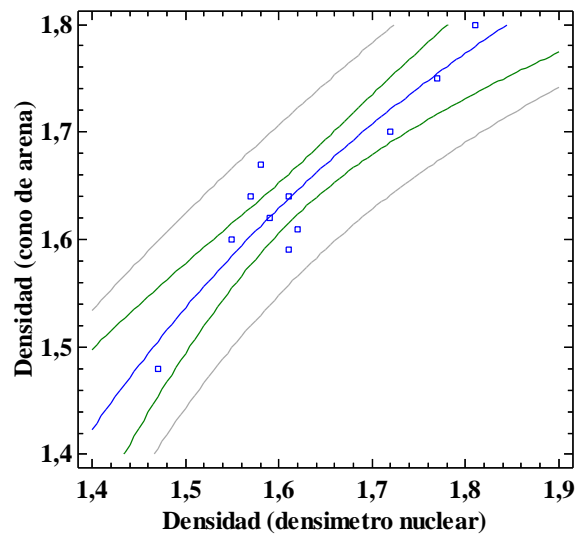
Tabla 4.18 Modelos de ajuste suelo A-4

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,9303	86,54%
Cuadrado-Y Log-X	0,93	86,50%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,9296	86,42%
Cuadrado de Y	0,9291	86,31%
Inversa de X	-0,928	86,11%

Fuente: Software Statgraphics

Se selecciono el modelo de ajuste **Cuadrado-Y Inversa de X**, ya que la relación que existe entre las densidades secas obtenidas entre el cono de arena y densímetro nuclear es fuerte, con una correlación de -0,9303 y un R^2 de 86,54%.

Gráfica 4.17 Cono de arena vs Densímetro nuclear



Fuente: Software Statgraphics

$$\rho_{CA} = \sqrt{7,064 - \frac{7,055}{\rho_{DN}}}$$

Donde:

ρ_{CA} = Densidad seca cono de arena

ρ_{DN} = Densidad seca densímetro nuclear

4.18.2 Correlación de la densidad de los suelos A-6

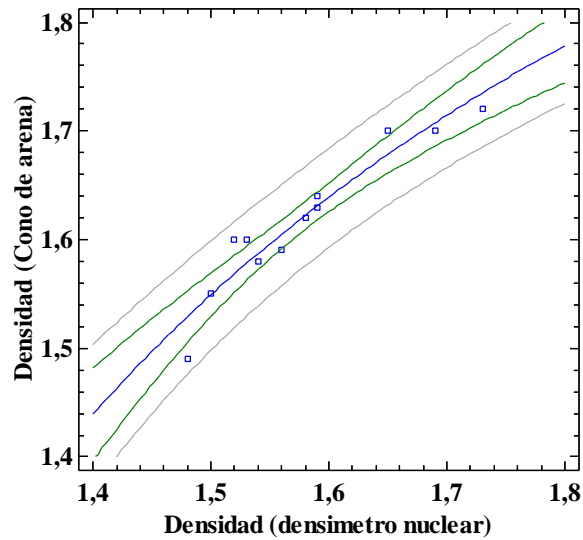
Tabla 4.19 Modelos de ajuste suelo A-6

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,9583	91,83%
Cuadrado-Y Log-X	0,955	91,20%
Inversa de X	-0,9538	90,97%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,9531	90,85%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,9512	90,49%

Fuente: Software Statgraphics

Se seleccionó el modelo de ajuste **Cuadrado-Y Inversa de X**, ya que la relación que existe entre las densidades secas obtenidas entre el cono de arena y densímetro nuclear es fuerte, con una correlación de -0,9583 y un R² de 91,83 %.

Gráfica 4.18 Cono de arena vs Densímetro nuclear



Fuente: Software Statgraphics

$$\rho_{CA} = \sqrt{6,985 - \frac{6,878}{\rho_{DN}}}$$

Donde:

ρ_{CA} = Densidad seca cono de arena

ρ_{DN} = Densidad seca densímetro nuclear

4.18.3 Correlación de la densidad de los suelos A-7

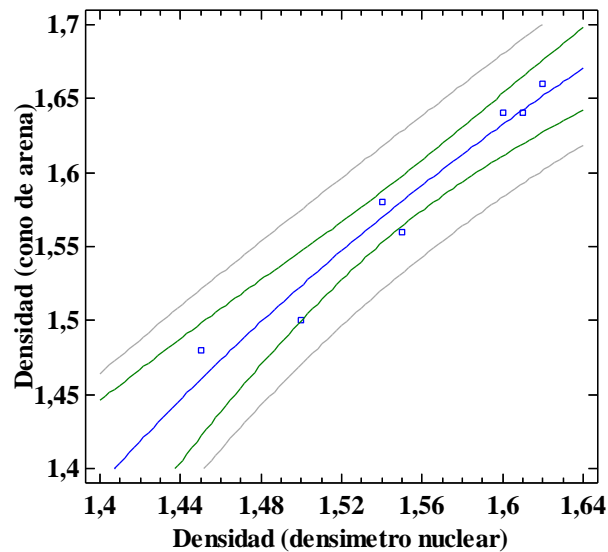
Tabla 4.20 Modelos de ajuste suelo A-7

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,9815	96,34%
Log-Y Cuadrado-X	0,9812	96,28%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,981	96,24%
Cuadrado de X	0,9807	96,18%
Inversa de Y	-0,9806	96,16%

Fuente: Software Statgraphics

Se seleccionó el modelo de ajuste **Cuadrado-Y Inversa de X**, ya que la relación que existe entre las densidades secas obtenidas entre el cono de arena y densímetro nuclear es fuerte, con una correlación de -0,9815 y un R² de 96,34 %.

Gráfica 4.19 Cono de arena vs Densímetro nuclear



Fuente: Software Statgraphics

$$\rho_{CA} = \sqrt{7,798 - \frac{8,214}{\rho_{DN}}}$$

Donde:

ρ_{CA} = Densidad seca cono de arena

ρ_{DN} = Densidad seca densímetro nuclear

4.19 Prueba de hipótesis

Este análisis muestra los resultados de realizar una prueba de hipótesis relativa a la diferencia entre dos medias ($\mu_1 - \mu_2$) de muestras provenientes de distribuciones normales. Las dos hipótesis a ser evaluadas aquí son:

Hipótesis nula: $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$

Hipótesis alterna: $\mu_1 - \mu_2 < > 0$

4.19.1 Verificación de hipótesis

Tabla 4.21 Prueba de Hipótesis

Variable	Cono de Arena	Densímetro nuclear
Identificación	μ_1	μ_2
Tamaño de muestra	30	30
Media muestral	1,62	1,59
Desviación	0,077	0,086
Valor-P = 0.160022		

Fuente: Elaboración propia

Se realizó la comparación de hipótesis entre las densidades secas obtenidas entre ambos métodos cono de arena y densímetro, de este modo se acepta la hipótesis nula.

Debido a que el valor -P es mayor que 0,05; no se rechaza la hipótesis nula con un 95% de nivel de confianza.

4.19.2 Prueba de hipótesis densidad seca cono de arena

Tabla 4.22 Prueba de hipótesis densidad seca cono de arena

Prueba	Valor -P
Prueba t	0
Prueba de los signos	$1,1949 \times 10^{-7}$
Prueba de rangos con signo	$1,799 \times 10^{-6}$
Prueba Chi cuadrado	0

Fuente: Elaboración propia

Mediante el software de Statgraphics se realizó la prueba de hipótesis donde se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 4-10.

De los cuales se puede rechazar la hipótesis nula con un 95% de confianza, ya que en todas las pruebas el valor de -P es menor a 0,05.

4.19.3 Prueba de hipótesis densidad densímetro nuclear

Tabla 4.23 Prueba de hipótesis densidad seca densímetro nuclear

Prueba	Valor -P
Prueba t	0
Prueba de los signos	$1,1949 \times 10^{-7}$
Prueba de rangos con signo	$1,81 \times 10^{-6}$
Prueba Chi cuadrado	0

Fuente: Elaboración propia

Mediante el software de Statgraphics se realizó la prueba de hipótesis donde se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 4-11

De los cuales se puede rechazar la hipótesis nula con un 95% de confianza, ya que en todas las pruebas el valor de -P es menor a 0,05.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Al finalizar la investigación se llegó a las siguientes conclusiones:

- Los objetivos tanto generales como específicos planteados inicialmente se han logrado satisfactoriamente.
- Los resultados tanto de densidad seca y humedad obtenidas entre los ensayos cono de arena y densímetro nuclear difieren entre sí, a pesar de que se realizaron de manera paralela.
- Al realizar la comparación entre la densidad seca obtenida entre el cono de arena y el densímetro nuclear se evidenció que; los datos de densidad seca que se obtiene del ensayo cono de arena son mayores a las obtenidas por el densímetro nuclear, aunque en algunos puntos sucede lo contrario.
- Se pudo observar que al realizar el ensayo de densímetro nuclear se puede generar una gran incertidumbre al momento de determinar la densidad seca, ya que influye las características del suelo si este cuenta con espacios vacíos o material granular en el mismo.
- En el ensayo cono de arena los valores de densidad seca obtenidos están en un rango de $1,48 \text{ gr/cm}^3$ a $1,80 \text{ gr/cm}^3$. En el caso de los valores de densidad seca obtenidos en el ensayo densímetro nuclear los valores se encuentran entre $1,45 \text{ gr/cm}^3$ a $1,81 \text{ gr/cm}^3$.
- El promedio obtenido de los valores de densidad seca por el método cono de arena es de $1,62 \text{ gr/cm}^3$ y en el caso del densímetro nuclear se obtuvo un promedio de $1,59 \text{ gr/cm}^3$. Donde se obtuvo un porcentaje de variación de $-1,79\%$.
- Al realizar el análisis de correlación de la densidad seca obtenida con el cono de arena y densímetro nuclear se llegó a determinar que tienen un coeficiente de correlación fuerte; por lo tanto, los valores de densidad seca obtenidos con el cono de arena y densímetro nuclear mantienen una relación entre sí.
- El análisis de correlación de humedades obtenidas entre el cono de arena y densímetro nuclear arrojaron un coeficiente de correlación moderado; por lo tanto,

los datos de humedades obtenidos por los distintos métodos guardan relación entre sí.

- Al utilizar el densímetro nuclear se obtiene valores de humedad mayores a los obtenidos por el cono de arena. Estos contenidos de humedad mayores se pueden atribuir a que el principio de funcionamiento de los equipos nucleares se basa en la medición del contenido de hidrógeno que contiene el material y por ende el agua, pero también se incluye el hidrógeno contenido en los huecos que tienen las partículas.
- Se llegó a determinar que ambos equipos son confiables al momento de determinar la densidad seca del suelo. Sin embargo, el ensayo de cono de arena es un método destructivo además que toma más tiempo en su ejecución, contrariamente a lo que sucede con el densímetro nuclear que es un método no destructivo y su tiempo de ejecución es más corto respecto al cono de arena.
- Al realizar el análisis estadístico y la depuración de datos por medio de los porcentajes de variación se logró obtener una mejor correlación, además que podemos apreciar los límites de confianza que se encuentran entre 0,67% y 3,70% de los porcentajes de variación.
- En el análisis realizado por tipo de suelo se observó que en los suelos de tipo A-4 el porcentaje de variación obtenido es de -1,10%, en los suelos de tipo A-6 un porcentaje de variación de -2,38% y en el caso de los suelos tipo A-7 un porcentaje de variación de -1,70%.

Tabla 5.1 Ventajas

Ventajas	
Cono de arena	Densímetro nuclear
Es de fácil transporte y de operación desde el laboratorio hasta el sitio.	El ensayo es de rápida ejecución y sus resultados se obtienen de manera inmediata.
Al momento de realizar las pruebas no requiere de personal capacitado.	Por su corta duración del ensayo, se puede realizar muchas pruebas en un día.
No resulta costoso.	Es un método no destructivo.
No tiene elementos radioactivos, por lo tanto, es más seguro para el operador.	Depende menos del operador, ya que el aparato debe estar calibrado y estandarizado.
Sus resultados son más confiables.	No requiere de cálculos.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.2 Desventajas

Desventajas	
Cono de arena	Densímetro nuclear
Es un método destructivo, ya que se realiza un hueco y altera la estructura del suelo.	Por contar con elementos radiactivos, son de alta peligrosidad.
Sus resultados demoran en ser obtenidos, ya que tiene que pasar por un proceso de gabinete.	No se puede analizar visualmente la capa testeada.
Depende del operador.	Los resultados presentan menor confiabilidad.
Debido a la duración del ensayo no se puede realizar muchas pruebas en un día.	Requieren de una capacitación antes del uso del equipo.

Fuente: Elaboración propia

5.2 Recomendaciones

- Al extraer las muestras de suelo se debe observar que estas no hayan sido alteradas, ya que esto podría variar resultados de forma directa.
- De los resultados obtenidos de densidad seca y humedad medidos por el densímetro nuclear, es recomendable efectuar al menos 3 mediciones en cada punto con el fin de obtener resultados representativos y disminuir los errores que se producen al no considerar la heterogeneidad del material.
- Al ejecutar el ensayo con el densímetro nuclear es necesario delimitar el área de trabajo para evitar que personas se acerquen mientras el equipo emite radiación.
- Es necesario realizar el proceso de estandarización en el densímetro nuclear al inicio de cada jornada para garantizar que los resultados de los ensayos que arroje el equipo sean confiables.
- Realizar la limpieza y control de humedad de la arena recuperada en el ensayo del cono de arena, además tamizarla nuevamente antes de su uso según norma.
- Las muestras extraídas del cono de arena deben ser guardadas correctamente para que no se alteren los porcentajes de humedad.