

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**Estimación de parámetros de compactación y resistencia de soporte en
suelos de subrasante utilizando redes neuronales artificiales
supervisadas en la pavimentación de la av. Ejército de Andrés Avelino
Cáceres Ayacucho, 2021**

Tesis para optar el título profesional de:
Ingeniero Civil

Presentado por:
Bach. Jonathan Joel Escobar Ventura

Asesor:
Msc. Ing. Angel Hugo Vilchez Peña

Ayacucho - Perú

2024

Dedico esta Tesis a mis padres Diosdado y Angélica, quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional en todo momento de mi vida, por sus enseñanzas, consejos y por su eterna paciencia.

A mis hermanos por el apoyo incondicional y la motivación para la realización de la investigación.

AGRADECIMIENTOS

- ✍ A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, mi alma máter y a los docentes por la enseñanza impartida durante mi vida académica.
- ✍ Al Dr. Ing. Ángel Hugo Vélchez Peña por asesorarme en el desarrollo de la Tesis.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA AYACUCHO, FEBRERO DE 2024

Jonathan Joel Escobar Ventura

índice general

	<i>Página</i>
Portada	a
Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Índice general	III
Índice de figuras	VI
Índice de tablas	VIII
Lista de siglas y símbolos	IX
Glosario	X
Acrónimos	XII
Resumen	XIII
I. Generalidades	1
1.1. Descripción de la realidad problemática	1
1.2. Delimitación del problema	1
1.2.1. Espacial.....	1
1.2.2. Temporal	2
1.2.3. Temática y unidad de análisis	2
1.2.4. Temática	2
1.2.5. Unidad de análisis	2
1.3. Formulación del problema	3
1.3.1. Problema general.....	3
1.3.2. Problemas específicos.....	3
1.4. Justificación e importancia	3
1.5. Limitaciones o restricciones	4
1.6. Objetivos	4
1.6.1. Objetivo general.....	4

1.6.2. Objetivos específicos	4
II. Estado del Arte	5
2.1. Antecedentes	5
2.1.1. Investigaciones internacionales	5
2.1.2. Investigaciones nacionales.....	7
2.2. Agregado del suelo, plasticidad y clasificación.....	9
2.2.1. Introducción.....	9
2.2.2. Límites de tamaño separado de suelos	9
2.2.3. Consistencia de suelos cohesivos	12
2.2.3.1. Límite líquido.....	12
2.2.3.2. Límite plástico	18
2.2.3.3. Índice de liquidez.....	20
2.2.3.4. Distribución granulométrica del suelo.....	20
2.2.3.5. Relación peso volumen.....	23
2.2.3.6. Densidad relativa y compactación relativa	30
2.2.3.7. Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).....	31
2.2.3.8. Sistema de clasificación AASHTO	34
2.2.3.9. Compactación.....	38
2.3. Marco conceptual.....	40
2.3.1. Modelamiento de redes neuronales artificiales	40
2.3.1.1. Prueba de modelo de productividad y validación	44
III.Método de la investigación	46
3.1. Enfoque.....	46
3.2. Alcance	46
3.3. Diseño de investigación	46
3.4. Población y muestra	46
3.4.1. Población	46
3.4.2. Muestra.....	47
3.5. Hipótesis	47
3.5.1. Hipótesis general.....	47
3.5.2. Hipótesis específicas	47
3.6. Operacionalización de variables	47
3.6.1. Variables e indicadores	47
3.7. Técnicas e instrumentos.....	48

3.7.1. Técnicas	48
3.7.2. Instrumentos	48
3.8. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información.....	48
3.9. Desarrollo de la investigación	49
3.9.1. Simbología de los tipos de suelos según SUCS y AASHTO	49
3.9.2. Normalización de datos	50
3.9.3. Exportación de los datos del WORKSPACE a la nntool	73
3.9.4. Creación de la arquitectura de la red neuronal artificial	74
3.9.5. Configuración para el entrenamiento de la red	75
IV. Resultados	79
4.1. Resultados.....	79
Conclusiones y Recomendaciones	96
Conclusiones.....	96
Recomendaciones	96
Temas afines por investigar.....	96
Referencias Bibliográficas	97
A. ANEXO A	100
A.1. Imágenes de pruebas de laboratorio para Proctor	100

Índice de figuras

1.	Consistencia de suelos cohesivos.....	12
2.	Diagrama esquemático del dispositivo de límite líquido.	13
3.	Diagrama esquemático del dispositivo de límite líquido.	13
4.	Contenido de humedad en función del número de golpes.	14
5.	Determinación del límite líquido con la penetración de la caída de cono.	16
6.	Gráfica del contenido de humedad versus la penetración del cono para determinación del límite líquido.	16
7.	Límites líquidos y plásticos de la arcilla Cambridge Gault determinados por la prueba del cono de caída.....	19
8.	Límites líquidos y de caída.....	22
9.	Relación peso volumen para agregados de suelos masa del suelo para el volumen V y las 3 fases de la masa de suelo.....	23
10.	Relación peso volumen para $V_S = 1$	25
11.	Relación peso volumen para $V_S = 1$	26
12.	Relación peso volumen para suelo saturado con $V_S=1$	27
13.	Relación peso volumen para $V=1$	28
14.	Relación suelo agua.....	29
15.	Peso unitario seco versus humedad óptima	39
16.	Arquitectura de 3 capas de feed forward con algoritmo de aprendizaje de backpropagation.....	43
17.	Diagrama de flujo para redes neuronales artificiales	45
18.	Ingreso de los datos al WORKSPACE.....	73
19.	Predicción con redes neuronales artificiales	74
20.	Exportación de los datos del Works pace al nntool de MATLAB	74
21.	Creación de la red y arquitectura de datos	75
22.	Configuración de los parámetros de entrenamiento.....	76

23. Validación de la red neuronal para la prueba	77
24. Regresión lineal de los datos de ingreso a la red neuronal	77
25. Rendimiento y desempeño de la red.....	78
26. Descenso de gradiente y validación por épocas	78
A.1. Ensayos de laboratorio de Proctor.	100
A.2. Ensayos de laboratorio de Proctor.	101
A.3. Ensayos de laboratorio de Proctor.	101
A.4. Ensayos de laboratorio de Proctor.	102
A.5. Ensayos de laboratorio de Proctor.	103
A.6. Ensayos de laboratorio de Proctor.	104

Índice de tablas

1. Plano de Ubicación y Localización del Distrito de Andrés Avelino Cáceres Dorregaray.....	2
2. Límites de tamaño separado de suelos	10
3. Límites de tamaño separado de suelos	17
4. Tamices estándar de EE. UU.....	20
5. Relación de vacíos y peso unitario seco.....	29
6. Tabla de plasticidad	31
7. Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).....	32
8. Clasificación de los materiales del subsuelo de las carreteras AASHTO.....	36
9. Variables e Indicadores.....	48
10. Simbología para la normalización e ingreso a la red	49
11. Valores estadísticos de los parámetros de ingreso	50
12. Parámetros o valores ingresados a la red neuronal artificial	52
13. Parámetros o datos normalizados ingresados a la red neuronal artificial	67
14. Densidad seca máxima(gr/cm ³) y la densidad generada por la Red Neuronal Artificial y el error cuadrático medio.....	80
15. Densidad seca máxima(gr/cm ³) y la densidad generada por la Red Neuronal Artificial y el error cuadrático medio	87
16. Contenido de humedad óptimo (%) y la densidad generada por la Red Neuronal Artificial y el error cuadrático medio	87
17. Resultados del contenido de humedad para las muestras con redes neuronales artificiales y resultados de laboratorio	95

Lista de siglas y símbolos

SUCS: Sistema Unificado de clasificación de suelos

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

f'_c : Resistencia característica a compresión

G: Gravel o grava

S: Sand o arena

M: Silt o limo

C: Clay o arcilla

O: Suelos orgánicos

LVDT: Sensor de Desplazamiento (*Linear variable Differential Transformer*]

MEF: Método de Elementos Finitos

INEI: Instituto Nacional de Estadística e Informática

NTP: Norma Técnica Peruana

ANA: Autoridad Nacional del agua

SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

FAO: Food and Agriculture Organisation

USGS : United State Geological Survey

NASA: National Aeronautics and Space Administration

SCS: Soil Conservation Service

NRCS: Natural Resources Conservation Service

CN: Curve Number (Número de curva).

Próctor Ensayos para controlar la compactación de terraplenes y plataformas a través de la densidad máxima seca y el contenido de humedad eliminando los vacíos que se pueden encontrar en la compactación de suelos.

Compactación Un suelo adecuadamente compactado puede soportar cargas de manera más efectiva y minimizar la posibilidad de asentamientos diferenciales o fallas estructurales.

Límites de Atterberg Los límites Atterberg incluyen tres límites principales como son el límite líquido, el límite plástico y el límite de contracción retracción.

Límites líquidos El límite líquido es una medida importante de la plasticidad de un suelo y se utiliza en la clasificación de suelos. Los suelos con un límite líquido alto suelen ser más plásticos y tienden a mostrar cambios significativos en volumen cuando están sometidos a cambios en la humedad. Estos suelos pueden ser problemáticos en la construcción, ya que pueden experimentar asentamientos y deformaciones excesivas bajo cargas.

Límites plásticos El límite plástico es una medida de la cohesión del suelo y su capacidad para ser moldeado. Los suelos con un límite plástico más alto son generalmente más cohesivos y tienen una mayor plasticidad. Estos suelos tienden a mantener su forma cuando se moldean y pueden ser susceptibles a la contracción y la expansión cuando se someten a cambios en la humedad.

Límites de retracción Cuando un suelo pierde humedad y se seca, tiende a contraerse. La cantidad de contracción y cómo esta contracción se relaciona con la pérdida de humedad se mide utilizando el Límite de Retracción.

Contenido de humedad óptimo El contenido de humedad óptimo es un parámetro crítico en la ingeniería geotécnica que influye en la eficiencia y efectividad de la compactación del suelo para proyectos de construcción.

Densidad seca máxima La densidad seca máxima es un parámetro crucial para la ingeniería geotécnica y la construcción, ya que influye directamente en la capacidad de carga y estabilidad del suelo en una variedad de proyectos de construcción.

Granulometría La granulometría es el estudio de la distribución de los tamaños de las partículas en un material, especialmente en los suelos y los agregados utilizados en la construcción. En otras palabras, se refiere a la descripción de cómo están distribuidas las partículas de diferentes tamaños en una muestra de suelo o agregado.

Modelo Es una representación parcial o simplificada de la realidad que recoge aquellos aspectos de relevancia para las intenciones del modelador, y de la que se pretende extraer conclusiones de tipo predictivo. Se modela para comprender o explicar mejor un proceso o unas observaciones. Un mismo objeto puede ser modelado con distintas técnicas y distintas intenciones, de forma que cada modelo resalta sólo ciertos aspectos del objeto.

Software El software es un conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas que permiten ejecutar distintas tareas en una computadora. Se considera que el software es el equipamiento lógico e intangible de un ordenador.

Desempeño de red Se refiere a cómo bien o mal la red neuronal realiza la tarea específica para la que fue diseñada. En el contexto del aprendizaje automático y la inteligencia artificial, el desempeño es una medida crítica que evalúa la capacidad de una red neuronal para hacer predicciones precisas o tomar decisiones acertadas en función de los datos de entrada.

Peso sináptico Es una medida de la influencia que una neurona tiene sobre otra a través de esta sinapsis. Se relaciona con la cantidad de neurotransmisores liberados en la sinapsis y la sensibilidad de la neurona receptora a esos neurotransmisores. En esencia, representa la fuerza con la que la señal se transmite de una neurona a otra.

RELU: Función de Activación lineal (*RELU*)

SUCS: Sistema unificado de clasificación de suelos (*SUC*)

TAP: Panel analista de tráfico (*Traffic Analyst Panel*)

LOD: Nivel de desarrollo (*Level of Development*)

FHWA: Administración Federal de Carreteras (*Federal Highway Administration*)

CFI: Intersección de flujo continuo (*Continuos Flow Intersection*)

GIS: Sistemas de Información Geográfica (*Geographic Information Systems*)

ICD: Instituto de la Construcción y Desarrollo

CAPECO: Cámara Peruana de la Construcción

BIM 2D: Modelo en planta

BIM 3D: Modelo tridimensional

BIM 4D: Modelo tridimensional agregado el factor tiempo

BIM 5D: Modelo tridimensional control de costos

BIM 6D: Modelo tridimensional sostenibilidad

BIM 7D: Modelo tridimensional de gestión de operaciones

MTC: Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú

PVI: Punto de intersecciones verticales

Resumen

El objetivo principal de la presente investigación es la estimación de los parámetros del ensayo próctor como son la densidad máxima seca (gr/cm^3) y el contenido de humedad óptimo (%) y el método utilizado en la presente investigación es el modelo de red neuronal artificial de Feed Forward backpropagation para su entrenamiento y validación hasta alcanzar un buen desempeño para la predicción de los datos alcanzando entre un 70 a 80 %, utilizando 3 capas en la arquitectura de datos como son el input data o datos de entrada, Hidden Layer o capas ocultas y la capa de salida o output layer, donde utilizamos en cada capa 3 neuronas artificiales con el error cuadrático medio de 0.053 y una función de activación PURELIN utilizando la herramienta nntools y nrtools de MATLAB llegando a predecir los resultados de los parámetros próctor para la pavimentación de la avenida el Ejército Ayacucho, se utilizó la técnica de análisis documental y como instrumentos registros, y en los resultados finales se obtuvo los valores aproximados a la densidad máxima seca y al contenido de humedad óptima obtenidos del laboratorio en un 70 a 80 % de aproximación descritos en la tabla N° 4.2 y 4.4 de la presente investigación concluyendo que se tuvo un buen desempeño la red neuronal artificial para la predicción de los parámetros próctor.

PALABRAS CLAVES: Input Layer, Output layer, Hidden Layer, PURELIN.

Abstract

The main objective of this research is to estimate the parameters of the Proctor test, such as the maximum dry density (g/cm^3) and the optimal moisture content (%). The method used in this research is the artificial neural network model of Feed Forward backpropagation for its training and validation, aiming to achieve a good performance in data prediction, reaching an accuracy between 70 % and 80 %. This is accomplished by utilizing three layers in the data architecture: input data, hidden layers, and output layer. In each layer, three artificial neurons are used, with a mean squared error of 0.053 and a PURELIN activation function. The nntools and nrtools of MATLAB were employed for implementation. This allowed for the prediction of Proctor test parameter results for the paving of El Ejército Ayacucho Avenue. Documentary analysis was used as the technique, with records serving as the instruments. In the final results, approximate values for maximum dry density and optimal moisture content were obtained, with an accuracy of 70 % to 80 %, in comparison to laboratory data. These approximations are detailed in tables 4.2 and 4.4 of this research. It is concluded that the artificial neural network performed well in predicting the Proctor test parameters.

KEY WORDS: Input Layer, Output layer, Hidden Layer, PURELIN.

“El futuro tiene muchos nombres. Para los débiles es lo inalcanzable. Para los temerosos, lo desconocido. Para los valientes es la oportunidad”

— Víctor Hugo

Capítulo



GENERALIDADES

1.1 Descripción de la realidad problemática

En la práctica convencional la medida de la densidad seca y la humedad óptima se realiza en campo utilizando la prueba de cono de arena y en el laboratorio la prueba del próctor standard y modificado estos ensayos nos confirman los valores de estos parámetros de compactación, los problemas de suelos son causados generalmente por la excedencia de agua por ejemplo en las presas de tierra muchas veces es causada por el suministro de las aguas subterráneas y estos problemas geotécnicos podrían suponer pérdida de la resistencia al corte y deformación excesiva del suelo, este último puede ser en aumento (expansión) o disminución (asentamiento) en el espesor o volumen del suelo (Gunaydin, 2008).

El problema que se tiene de obtener los parámetros de compactación son muy laboriosos desde la obtención de las muestras de las calicatas, el tiempo y el costo para obtener los resultados son diversos y aun para poder determinar la resistencia del suelo se necesitan muchas pruebas y muchas muestras es por ello que la presente investigación nos proporciona una estimación temprana para tener idea en que tipo de suelo se va cimentar o en que tipo de suelo se va realizar la construcción de nuestra estructura, y de esta manera optimizar el costo y tiempo para tomar algunas decisiones en la definición de nuestra estructura en la elaboración de los expedientes técnicos.

1.2 Delimitación del problema

1.2.1 Espacial

El trabajo se llevará acabo en la región de:

Departamento: Ayacucho

Provincia: Huamanga

Distrito: Andrés Avelino Cáceres Dorregaray

Fuente: Elaboración Propia

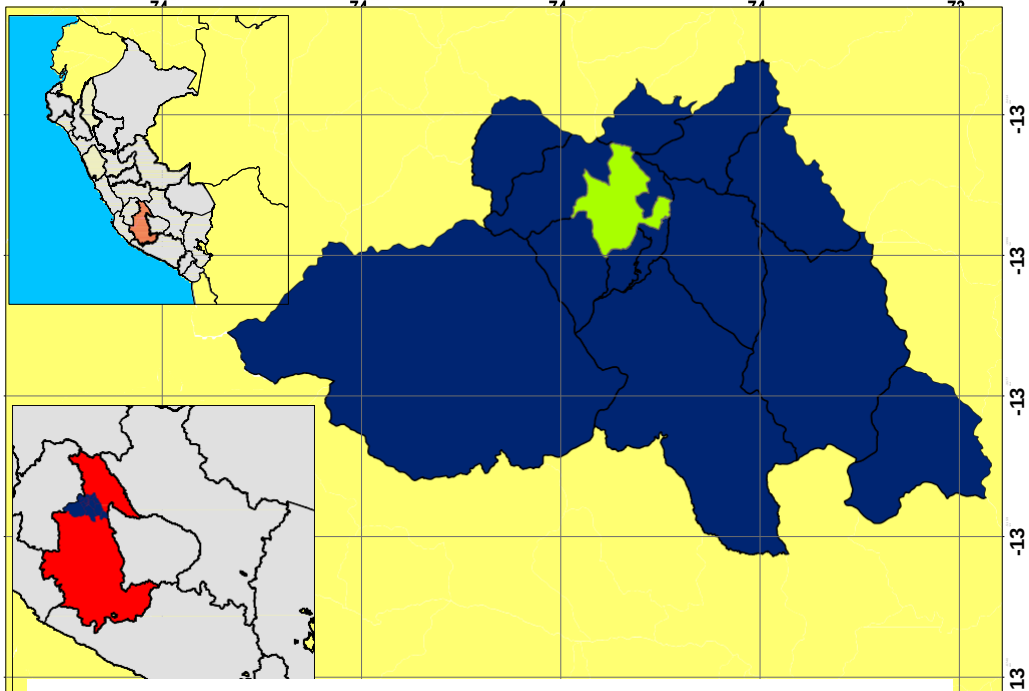


Figura N°01: Plano de Ubicación y Localización del Distrito de Andrés Avelino Cáceres Dorregaray.

1.2.2 Temporal

El trabajo se realiza entre el año 2021 al año del 2022 como menciona en el título de la investigación tiempo donde se desarrolló el proyecto para la pavimentación del proyecto en la avenida el ejército del distrito de Andrés Avelino Cáceres Dorregaray donde durante este intervalo de tiempo pondremos en investigación la obtención de los parámetros de resistencia.

1.2.3 Temática y unidad de análisis

1.2.4 Temática

Obtención de los parámetros de compactación utilizando redes neuronales artificiales

1.2.5 Unidad de análisis

La unidad de análisis son los parámetros de resistencia de compactación como el contenido de humedad óptima (%) y la densidad máxima seca (KN/m³) obtenidos del ensayo de

laboratorio denominado ensayo de la prueba de próctor standard modificado lo que nos indica en laboratorio el tipo de parámetros de resistencia que va tener la muestra para que posteriormente con este resultado se pueda controlar los trabajos de compactación y obtención de la resistencia del suelo para la subrasante en campo con el ensayo de cono de arena.

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema general

¿Cómo se pueden estimar los parámetros de compactación en suelos de subrasante utilizando redes neuronales artificiales en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021?

1.3.2 Problemas específicos

1. ¿Cómo se puede estimar parámetros de compactación y resistencia de soporte en suelos de subrasante utilizando la granulometría mediante las redes neuronales artificiales en la pavimentación de la Av. Ejército de Andrés Avelino Cáceres Ayacucho, 2021?
2. ¿Cómo se puede estimar parámetros de compactación en suelos de subrasante a partir de los límites de consistencia utilizando redes neuronales artificiales en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021?
3. ¿Como se puede estimar parámetros de compactación en suelos de subrasante a partir de la clasificación de suelos SUCS Y ASSTHO utilizando redes neuronales artificiales en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021?

1.4 Justificación e importancia

Los resultados de estimación del contenido de humedad óptima y la densidad máxima seca se lograrán obtener utilizando el modelo de la red neuronal artificial con entradas de los parámetros de suelos como índice de plasticidad , limite liquido, límite plástico ,gravas, finos, arenas ,clasificación SUCS, clasificación AASHTO y esperando como resultado de salida el contenido de humedad óptima y la densidad máxima seca encontrando el mejor modelo de la arquitectura de la red neuronal artificial en la iteración y en la salida de los mejores resultado obtenidos en el entrenamiento y la validación de datos. Esta investigación es importante porque tendremos estimación temprana de información de contenido de humedad óptima y la densidad máxima seca optimizando en tiempo y costo para la conocer la resistencia de los tipos de suelos donde se realizarán nuestros proyectos de ingeniería.

1.5 Limitaciones o restricciones

La limitación que se presenta en la investigación es exclusivamente para la estimación de los parámetros de resistencia como contenido de humedad óptima y densidad máxima seca como resultados del ensayo próctor de laboratorio y no para estimar los parámetros de resistencia de campo ya que la energía de compactación en el laboratorio es diferente a la energía de compactación aplicada en campo ya que en el laboratorio se tiende a utilizar una energía de compactación constante aplicando y contabilizando los números de golpes mientras en campo se utiliza la prueba de cono de arena que es diferente al de los laboratorios.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Determinar los parámetros de compactación en suelos de subrasante utilizando redes neuronales artificiales en en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021 .

1.6.2 Objetivos específicos

1. Estimar parámetros de compactación en suelos de subrasante a partir de la granulométrica utilizando redes neuronales artificiales en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021
2. Estimar parámetros de compactación en suelos de subrasante a partir de los límites de consistencia utilizando redes neuronales artificiales en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021
3. Estimar parámetros de compactación en suelos de subrasante a partir de la clasificación de suelos SUCS Y ASSTHO utilizando redes neuronales artificiales en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021

“Cuando amamos, siempre nos esforzamos por ser mejores de lo que somos. Cuando nos esforzamos por ser mejor de lo que somos, todo a nuestro alrededor se vuelve mejor”

— El Alquimista de Paulo Coelho

Capítulo

II

ESTADO DEL ARTE

2.1 Antecedentes

2.1.1 Investigaciones internacionales

Según [López \(2010\)](#) en la revista de investigación denominada “Ensayos de compactación en carreteras: Proctor Normal y Modificado”, de la universidad Politécnica de Valencia del departamento de ingeniería e infraestructura de los transportes, menciona que los terraplenes en las obras de carreteras deben tener cierta resistencia mecánica, mediante el proceso de compactación y las propiedades del suelo deberían mejorar; donde los objetivos son determinar la curva de compactación para calcular los parámetros de próctor, donde los resultados son la obtención de la densidad máxima seca(gr/cm^3) y el contenido de humedad óptimo (%).

Según [othman \(2023\)](#), en la revista científica “Estimation of the compaction parameters of aggregate base course using artificial neural networks”, de la universidad de Toronto del departamento de Ingeniería Civil, aplicado en pavimentos de asfalto rural y urbano en Egipto, cuenta con 22 publicaciones de investigación en su investigación, menciona que hay que invertir dinero y tiempo en un trabajo laborioso en laboratorio como son los

ensayos de próctor, por lo que la herramienta de las redes neuronales artificiales nos ayuda a predecir los resultados de la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptimo y la metodología a utilizar la recolección de datos del laboratorio para la realización de la red neuronal, y concluye que el ensayo es para predecir si los agregados están óptimos para la compactación.

Según la investigación de [Gunaydin \(2008\)](#) los parámetros de compactación solo puede definirse experimentalmente por el ensayo de laboratorio próctor pero las redes neuronales artificiales pueden estimar estos resultados, por ejemplo la colección de datos en una presa de Nidge Turkia donde se utilizaron la estimación de los parámetros de compactación con un análisis de regresión y redes neuronales artificiales donde la estimación indica una fuerte correlación de $r^2 = 0,70 - 0,95$ entre los parámetros de compactación y las propiedades de clasificación de suelos se han mostrado satisfactoriamemnte con los resultados de las pruebas y es recomendable el proposito de la correlación y es utilizado para diseños preliminares de proyectos donde se tienen limitaciones de presupuesto y de tiempo.

Según la investigación de [Ardakani y Kordnaej \(2017\)](#) los resultados del ensayo Proctor son muy importantes para la ingeniería geotécnica y las estructuras de tierra Como el ensayo Proctor es relativamente largo y laborioso, en la presente investigación el Método de Grupo de Datos (GMDH) para estimar parámetros de compactación como densidad seca máxima y contenido de humedad óptima de los suelos indirectamente a partir de propiedades de forma más sencilla, como el límite líquido (LL), el límite plástico (PL) y el contenido de grano fino (FC) Se utilizó una base de datos con 212 conjuntos de datos para el entrenamiento y la prueba de los modelos. Se realizó una comparación Los resultados demuestran que la red neuronal generalizada de tipo GMDH tiene una gran capacidad de predicción de los parámetros densidad seca máxima y humedad óptima Al final, se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad del modelo obtenido para estudiar la influencia de los parámetros de entrada en los resultados del modelo es importante utilizar algoritmos genéticos y redes neuronales artificiales para que la red aprenda y generalize el modelo.

Según la investigación de [\(AI-Khafaji, 2015\)](#) en suelos de Iraq y EE.UU la relación entre los límites de Atterberg (límite plástico y limite líquido) y compactación de suelos medido por el uso de la prueba de compactación de próctor standar son determinados cuantitativamente usando técnicas de curvas de ajustes estimando estadísticamente la relación entre estos parámetros.

En el CBR(California bearing ratio) la ingeniería siempre viene con dificultades en obtener

valores representativos de CBR esto es uno de los frecuentes índices de uso de pruebas para evaluar el módulo de rigidez y resistencia al corte del subsuelo, El BCR es en realidad una medida indirecta que indica la comparación de la resistencia del material de la subrasante con la resistencia de la roca triturada estándar mencionada en valores porcentuales. Muchos investigadores han llevado a cabo estudios para mostrar el efecto de los tipos y características del suelo sobre los valores de CBR. Algunos esfuerzos se dedicaron a correlacionar el CBR con la distribución del grano del suelo y la plasticidad. Entre ellos, Black desarrolló una correlación entre el CBR y el índice de plasticidad (IP) para suelos cohesivos (Taskiran, 2010).

El coeficiente de carga de California (CBR) se define como la relación entre la resistencia al hundimiento del pistón de penetración en el suelo con una velocidad de 1,27 mm/min (0,05 pulg./min) y la resistencia que muestra una muestra de roca triturada estándar para la misma profundidad de penetración. La resistencia CBR, definida como la relación entre la tensión aplicada (unidad de fuerza), de acuerdo con una energía específica del suelo comprimido en un contenido de humedad predeterminado en el control de velocidad para hundir el pistón de penetración para alcanzar la profundidad requerida, la tensión estándar aplicada, en el experimento mediante el uso de la lista de roca triturada para que el pistón llegue a la misma profundidad. La prueba del coeficiente de rodamiento de California puede realizarse tanto en el laboratorio como en el campo. El ensayo CBR de laboratorio se describe en la norma ASTM D 1883-99 (2003) y el ensayo CBR de campo se describe en la norma ASTM D 4429-93 (2003). En el laboratorio, la prueba CBR se realiza normalmente en muestras de suelo compactado, mientras que en el campo la prueba CBR se realizaría en la superficie del suelo, o en una superficie nivelada excavada en un pozo de prueba, zanja o corte de excavadora (Yildirim y Gunaydin, 2011)

$$CBR = (Tensión\ aplicada\ en\ el\ experimento(carga) / tensión\ estandar(carga)) * 100$$

2.1.2 Investigaciones nacionales

Según Mondragón y Chávez (2017) en la revista científica del docente de la Universidad Nacional de Cajamarca denominada “Influencia de la energía de compactación en la densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad de suelo granular”, nos menciona la importancia de la energía de compactación para el incremento de los parámetros de compactación y el método que utilizó se obtuvo muestra representativa granular en estado suelto donde se realizó los ensayos generales para determinar las propiedades físicas, concluyendo que los valores de densidad máxima seca y contenido de humedad aumentan en función a que la energía de compactación aumenta.

Según **Llique y Guerrero (2015)**, en la revista científica denominada “Influencia de la humedad de compactación en el comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos” de la Universidad de Trujillo Perú, La presente investigación tuvo como propósito determinar la influencia de la humedad de compactación en el comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos, y el método empleado para la presente investigación, se excavaron calicatas de profundidad de 2m y se obtuvo muestras representativas, se realizaron ensayos de granulometría, límites de Atterberg y se realizaron los ensayos especiales de proctor, para el análisis estadístico se utilizó Minitab15, concluyendo que los suelos arcillosos de alta plasticidad CH y de baja plasticidad CL compactados con humedades menores a la humedad óptima (rama seca de la curva de compactación) presentaron mayor expansión que los suelos arcillosos de alta plasticidad CH y de baja plasticidad CL compactados con humedades mayores a la humedad óptima (rama húmeda de la curva de compactación), porque el suelo con humedad menor a la óptima presenta mayor volumen de fase gaseosa y por ende mayor porcentaje de porosidad.

Según **Vázquez et al. (2018)**, en la revista denominada “El uso del test de proctor para la reducción de la compactación del suelo” de la universidad Nacional. El objetivo de este trabajo fue evaluar la posibilidad de predecir el nivel de compactación que producen diferentes condiciones de tráfico agrícola, variando el número de impactos del test de Proctor. Se tomaron muestras de suelo de las huellas de tres tractores de diferentes pesos a cuatro contenidos diferentes de humedad del suelo. En el mismo sitio se realizó el test de Proctor con 15, 25 y 35 golpes de pistón, con cinco contenidos de agua. Se trazaron las diferentes curvas de compactación del suelo, despejando los valores de máxima densidad aparente y contenido de humedad crítico para cada curva y el método de cálculo para la obtención de la curva del test de Proctor estándar (ASTM, 1992), se tomaron 45 muestras de suelo del sitio del ensayo, de aproximadamente 2,5 kg. Estas fueron secadas al aire para luego humedecerlas pulverizándolas con agua en bolsas de plástico con el fin de alcanzar cinco contenidos de agua diferentes. Las muestras permanecieron en bolsas durante 24 hs para homogeneizar el contenido de humedad. Cada muestra se compactó en tres capas superpuestas 225 en una cámara de compactación $0,911 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. Cada capa recibió 25 golpes de un pistón de 2,5 kg cayendo desde 0,305 m de altura. La energía de compactación fue de $593,7 \text{ kJm}^{-3}$ y se determinó el peso húmedo del suelo compactado en la cámara. Luego, las muestras se secaron en un horno a 105°C hasta peso constante para estimar el contenido de humedad y la densidad aparente seca. El mismo procedimiento se repitió para 15 y 35 golpes de pistón por capa para obtener dos curvas de compactación por encima y

por debajo de la del test de Proctor. Los resultados muestran que variando la energía de compactación Proctor con el número de golpes, los valores de densidad aparente máxima se encontraban muy por encima de los valores de densidad aparente medidos a campo bajo tráfico agrícola, por lo que la modificación del número de golpes del test de Proctor no permite predecir la compactación generada por el tráfico agrícola. Por otra parte, la humedad crítica Proctor se encontró en torno al 60 % de la humedad crítica de las curvas de compactación a campo.

2.2 Agregado del suelo, plasticidad y clasificación

2.2.1 Introducción

Los suelos son agregados de partículas minerales y junto con el aire y/o agua y los espacios vacíos estos forman las tres fases del sistema y es una porción de la superficie de la tierra está cubierta por suelo y estos son utilizados como cimentación en las construcciones. La mecánica de suelos es la rama de la ingeniería que se ocupa de las propiedades de los suelos y el comportamiento bajo tensión.

2.2.2 Límites de tamaño separado de suelos

Según **Braja Das (2019)**, naturalmente ocurre en muestras de suelos que tienen partículas de varios tamaños ,a lo largo de años, varios organismos han intentado desarrollar los límites de tamaño de la grava, arena, limo y arcilla , y algunos de estos límites de tamaños son mostrados en la siguiente tabla: y es importante notar que alguna agencia clasifican a la arcilla de pequeñas partículas inferiores a 0.005 mm en tamaño y otros clasifican estas pequeñas partículas de arcilla inferiores a 0.002 mm en tamaño ,Sin embargo, hay que tener en cuenta que las partículas definidas como arcilla en función de su tamaño no son necesariamente minerales, las partículas de arcillas poseen la tendencia para desarrollar la plasticidad cuando mezclado con agua; se trata de minerales arcillosos. La caolinita, la illita, la montmorillonita vermiculita y clorita son ejemplos de algunos minerales arcillosos.

Tabla N° 01: Límites de tamaño separado de suelos

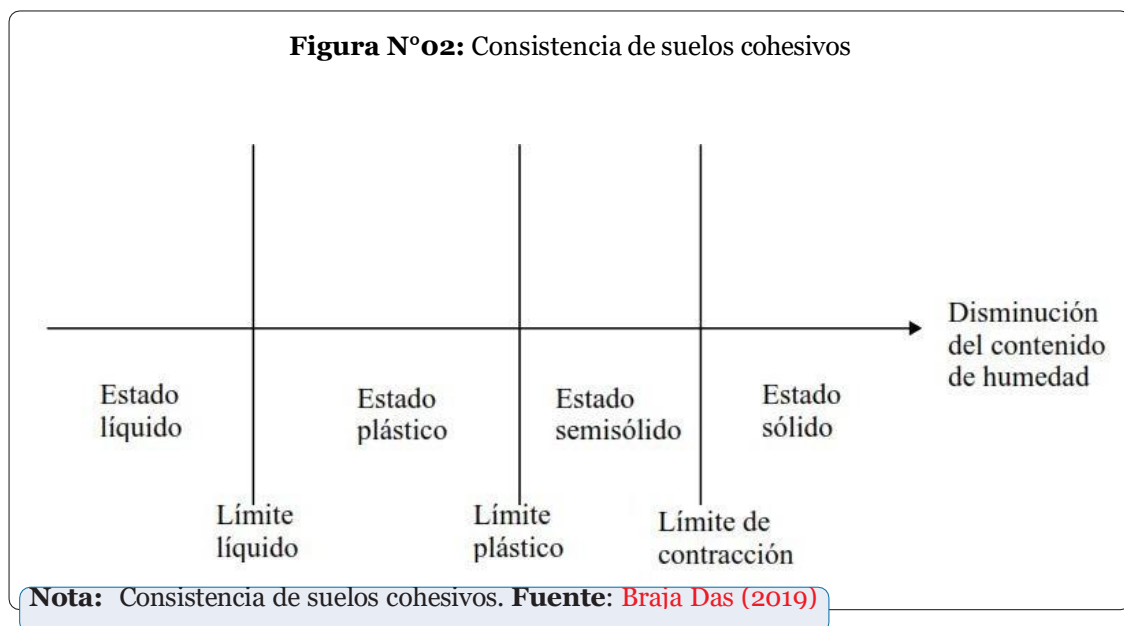
Agencia	Clasificación	Límite de tamaño(mm)
U.S Departamento de Agricultura (USDA)	Grava	>2
	Arena muy gruesa	44228.00
	Arena gruesa	1 - 0.5
	Arena media	0.5 - 0.25
	Arena fina	0.25 - 0.1
	Arena muy fina	0.1 - 0.05
	Limo	0.05 - 0.02
	Arcilla	<0.02
Sociedad internacional de mecánicas de suelos e ingeniería geotécnica(ISSMGE)	Grava	>2
	Arena gruesa	2 - 0.2
	Arena fina	0.2 - 0.02
	Limo	0.02 - 0.002
	Arcilla	<0.002
Administración de aviación federal(FAA)	Grava	>2
	Arena	2 - 0.075
	Limo	0.075 - 0.005
	Arcilla	<0.005
Instituto de tecnología MASSACHUSETTS(MIT)	Grava	>2
	Arena gruesa	2 - 0.6
	Arena media	0.6 - 0.2
	Arena fina	0.2 - 0.06
	Limo	0.06 - 0.002
	Arcilla	<0.002
Asociación Americana de carretera estatal y transporte oficial (AASHTO)	Grava	76.2 - 2
	Arena gruesa	2 - 0.425
	Arena fina	0.425 - 0.075
	limo	0.075 - 0.002
	arcilla	<0.002
Unificado (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU la Oficina de Reclamación de los EE. UU y la sociedad para pruebas y materiales)	Grava	76.2 - 4.75
	Arena gruesa	4.75 - 2
	Arena media	2 - 0.425

Arena fina	0.425 - 0.075
limos y arcillas (finos)	<0.075

Fuente: Elaboración Propia tomado del manuscrito de Mecánica de suelos avanzado de Braja M. DAS

2.2.3 Consistencia de suelos cohesivos

La presencia de minerales de arcilla en suelos de granos finos permitirá que se vuelva a moldear en presencia de algo de humedad sin que se desmorone si se seca una papilla de arcilla el contenido de humedad disminuirá gradualmente, y la lechada pasará de estado líquido a un estado plástico. Si se sigue secando, pasará a un estado semisólido y finalmente, al estado sólido, como se muestra en la figura. El científico Sueco Atterberg, desarrollo el método para describir la consistencia de límites de los suelos de granos finos basados en el contenido de humedad , estos límites son el límite líquido , el límite plástico y el límite de contracción el límite líquido es definido en el contenido de humedad en porcentaje cada cambio del suelo desde el estado líquido al estado plástico y el contenido de humedad (%) de cada cambio de suelo desde el plástico al estado semisólido y desde el estado semisólido al estado sólido son definidos en el límite plástico y límite de contracción respectivamente. Estos límites son generalmente referidos a los límites de Atterberg, los límites de Atterberg de suelos cohesivos dependen de varios factores, como la cantidad y el tipo de minerales de arcilla y el tipo de catión adsorbido(Braja Das, 2019).

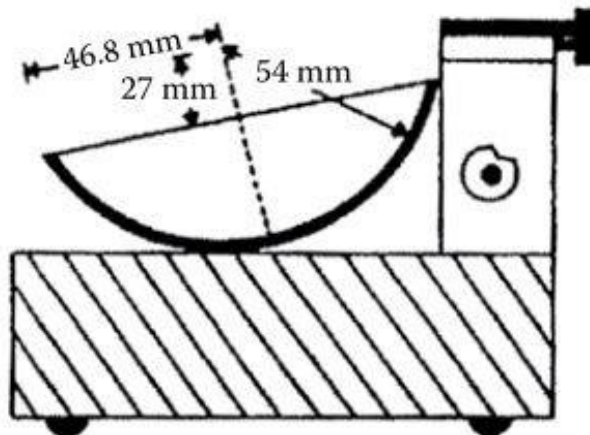


2.2.3.1 Límite líquido

Según Braja Das (2019) El límite líquido de los suelos es generalmente determinado por el dispositivo estándar de Casagrande un diagrama esquemático de los dispositivos de límite líquido es mostrado en la figura Este dispositivo consta de una copa de latón y una base de goma dura, La copa de latón puede caer sobre la base mediante una leve operación por una manivela : la presentación de la prueba del límite líquido hay que colocar una pasta de

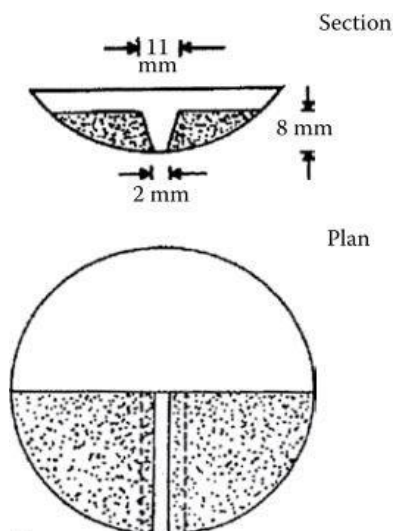
tierra en la taza y a continuación, se corta una ranura en el centro de la placa de suelo con la herramienta de ranurado estándar mediante la leva accionada por la manivela, el vaso se eleva y se deja caer desde una altura de 10 mm.

Figura N°02: Diagrama esquemático del dispositivo de límite líquido.



Nota: Dispositivo de límite líquido. **Fuente:** Braja Das (2019)

Figura N°03: Diagrama esquemático del dispositivo de límite líquido.



Nota: Dispositivo de límite líquido. **Fuente:** Braja Das (2019)

Se realizan tres pruebas para el mismo suelo con diferentes contenidos de humedad, con el número de golpes, N , necesarios para lograr el cierre varía entre 15 y 35. El contenido de humedad del suelo, en porcentaje, y el correspondiente número de golpes El contenido de humedad del suelo, en porcentaje, y el correspondiente número de golpes se representan

en un papel gráfico semilogarítmico. La relación entre el contenido de humedad y el log N se aproxima como una línea recta. Esta línea se denomina curva de flujo. El contenido de humedad correspondiente a $N = 25$, determinado a partir de la curva de flujo, da el límite líquido del suelo. La pendiente de la línea de flujo se define como el índice de flujo y puede escribirse como:

$$I_F = \frac{w_1 - w_2}{\log \frac{N_2}{N_1}} \quad (\text{II.1})$$

donde:

I_F = Índice de flujo

w_1 = Contenido de humedad del suelo en porcentaje correspondiente a N_1 golpes.

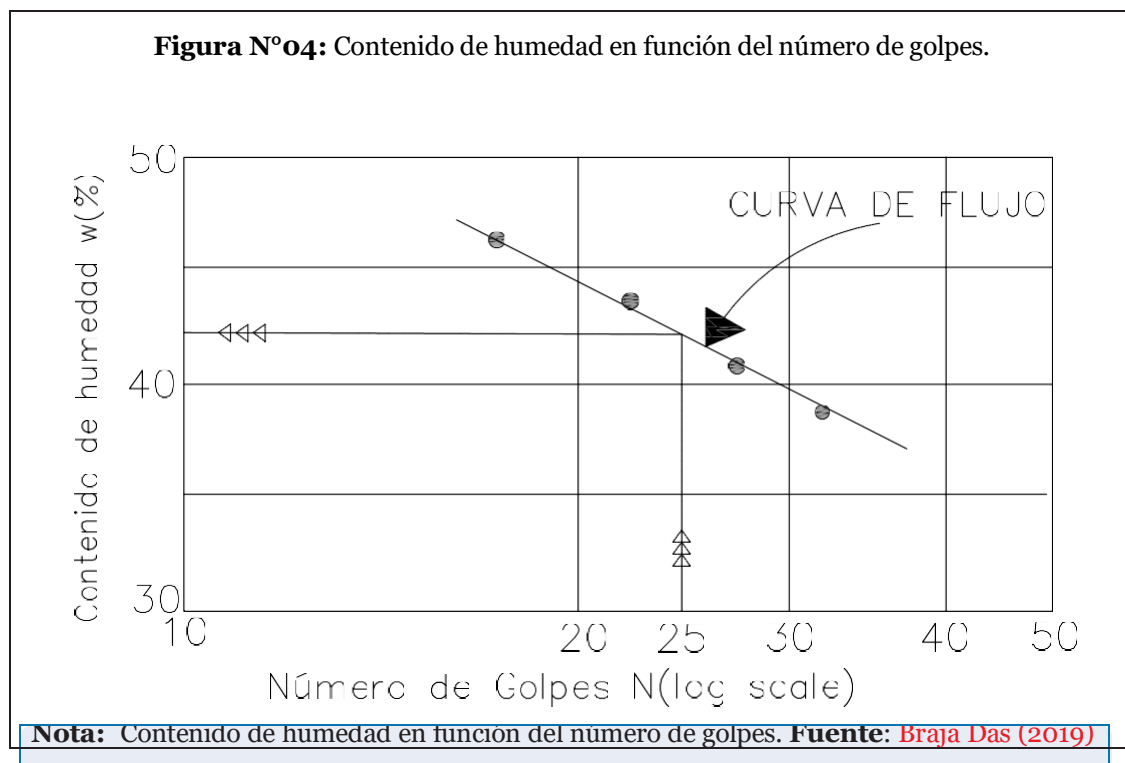
w_2 = Contenido de humedad del suelo en porcentaje correspondiente a N_2 golpes.

Nótese que w_2 y w_1 se intercambian para dar un valor positivo, aunque la pendiente de la línea de flujo sea negativa. Así, la ecuación de la línea de flujo puede ser escrita en forma general como:

$$w = -I_F \log N + C \quad (\text{II.2})$$

Donde:

C = Constante.



A partir del análisis de cientos de pruebas de límite de líquidos en 1949, el Cuerpo de

Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, en la Estación Experimental de Vías Navegables de Vicksburg, Mississippi, propuso una ecuación empírica de la forma:

$$LL = w_N \left(\frac{N}{25} \right)^{\tan \beta} \quad (2.3)$$

Donde:

N = es el número de golpes en el dispositivo de límite de líquido para un cierre de ranura de 12,7 mm

w_N = Es la correspondiente al contenido de humedad.

La ecuación 1.17 suele dar buenos resultados para el número de golpes entre 20 y 30. En el caso de los ensayos rutinarios de laboratorio, puede utilizarse para determinar el límite de líquido cuando sólo se realiza un ensayo para un suelo. Este procedimiento se conoce generalmente como el método de un punto y también fue adoptado por ASTM bajo la designación D-4318 (ASTM, 2014). La razón por la que el método de un punto produce resultados bastante buenos es que un pequeño rango de humedad contenido de humedad cuando $N = 20-30$.

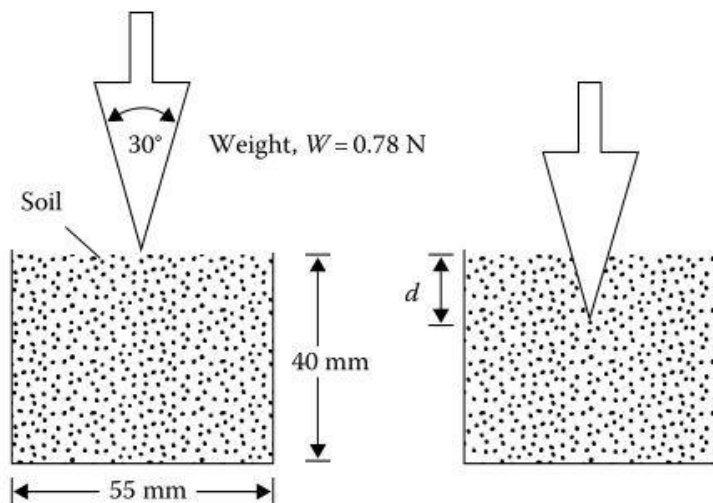
Otro método para determinar el límite líquido, que es popular en Europa y Asia, es el método del cono de caída (British Standard-BS 1377). En este ensayo, el límite líquido se define como el contenido de humedad al que un cono estándar con un ángulo de vértice de 30° y un peso de 0,78 N (80 gf) penetra una distancia $d = 20$ mm en 5 s cuando se deja caer desde una posición de contacto puntual con la superficie del suelo (Figura 1.26a). Debido a la dificultad de alcanzar el límite líquido en una sola prueba, se pueden realizar cuatro o más ensayos pueden realizarse con distintos contenidos de humedad para determinar la penetración del cono de caída penetración del cono, d , en 5 s. A continuación se puede trazar un gráfico semilogarítmico con el contenido de humedad w frente a la penetración del cono d . El gráfico da como resultado una línea recta. El contenido de humedad correspondiente a $d = 20$ mm es el límite líquido (Figura 1.26b). A partir de la figura 1.26b, el índice de fluidez puede ser definido como:

$$I_{FC} = \frac{w_2(\%) - w_1(\%)}{\log d_2 - \log d_1} \quad (2.4)$$

donde w_1 , w_2 son los contenidos de humedad en las penetraciones del cono de d_1 y d_2 respectivamente. Al igual que en el caso del método de la copa de percusión (ASTM D4318), se ha intentado desarrollar la estimación del límite líquido mediante un método de

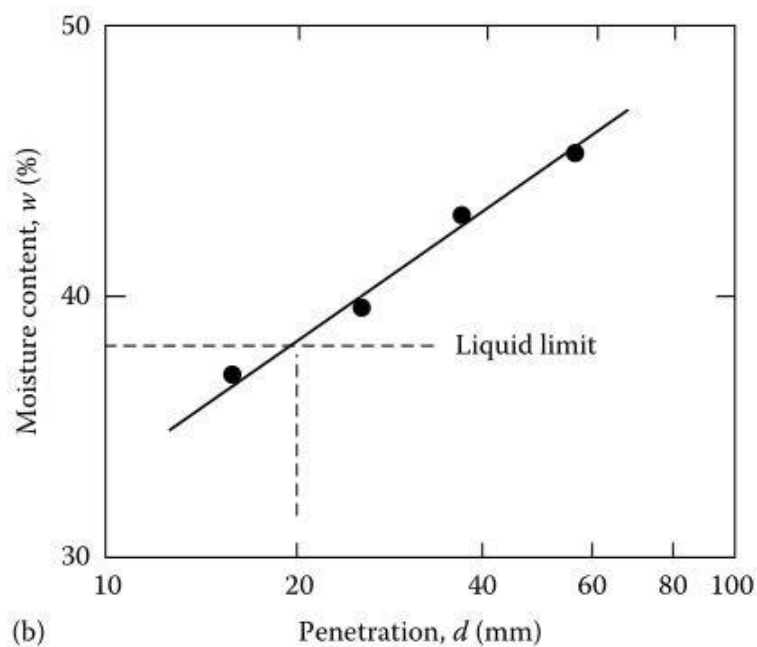
un punto.

Figura N°05: Determinación del límite líquido con la penetración de la caída de cono.



Nota: límite líquido con la penetración de la caída de cono. **Fuente:** Braja Das (2019)

Figura N°06: Gráfica del contenido de humedad versus la penetración del cono para determinación del límite líquido.



Nota: Penetración versus contenido de humedad. **Fuente:** Braja Das (2019)

estos son:

☞ **Nagaraj and Jayadeva (1981)**

$$LL = \frac{w}{0,77 \log d} \quad (2.5)$$

$$LL = \frac{w}{0,65 + 0,0175d} \quad (2.6)$$

☞ **Feng (2001)**

$$LL = w \left(\frac{20}{d} \right)^{0.33} \quad (2.7)$$

Tabla N°02: Límites de tamaño separado de suelos

Ciudad	Detalles del cono	Penetración para el límite líquido
Rusia	Ángulo de cono = 30° Masa de cono = 76 gr	10
Bretaña , Francia	Ángulo de cono = 30° Masa de cono = 80 gr	20
India	Ángulo de cono = 31° Masa de cono = 148 gr	20.4
Suecia, Canada(Québec)	Ángulo de cono = 60° Masa de cono = 60 gr	10

Fuente: Elaboración Propia tomado del manuscrito de Mecánica de suelos avanzado de Braja M. DAS

donde w (%) es el contenido de humedad para una penetración del cono d (mm) comprendida entre 15 mm y 25 mm. Las dimensiones del ángulo de la punta del cono, el peso del cono y la penetración (mm) a la que se determina el límite de líquido varían de un país a otro. país. La tabla 1.3 ofrece un resumen de los diferentes conos de caída utilizados en varios países. Varios estudios importantes han demostrado que la resistencia al corte no drenado del suelo en el límite líquido varía entre 1,7 y 2,3 kN/m². Basándose en pruebas realizadas en un gran número de muestras de suelo, Feng (2001) ha dado la siguiente correlación entre los límites líquidos determinados según ASTM D4318 y la norma británica.

$$LL_{(BS)} = 2,6 + 0,94[LL_{(ASTM)}] \quad (2.8)$$

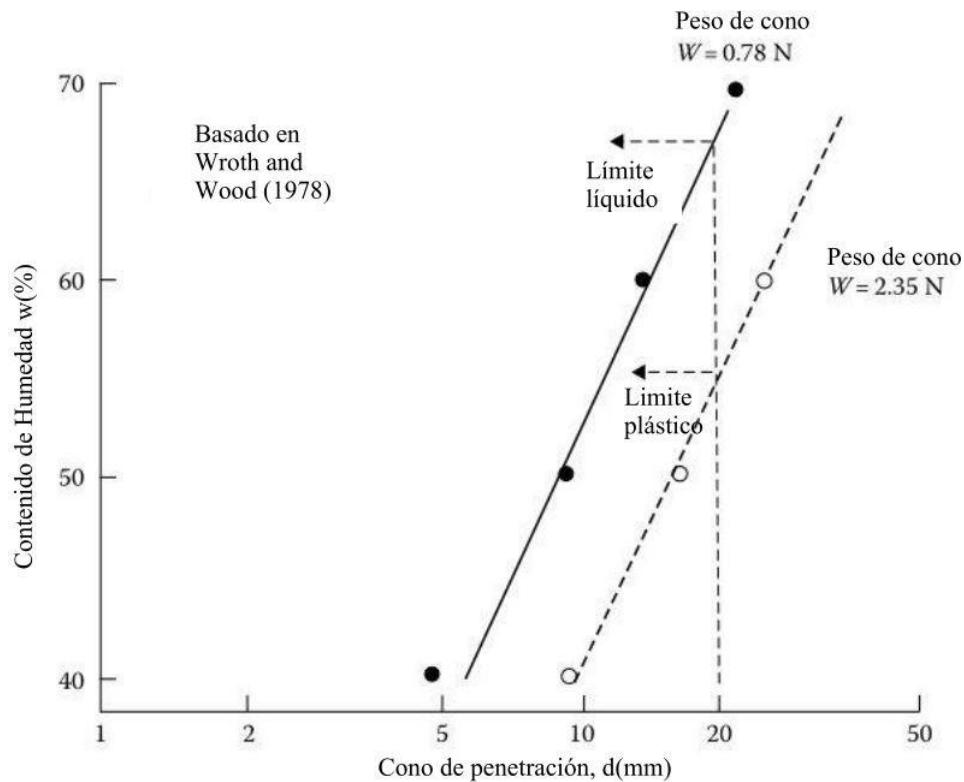
2.2.3.2 Límite plástico

Según Braja Das (2019) el límite plástico se define como el contenido de humedad, en porcentaje, al que el suelo se desmorona cuando se enrolla en hilos de 3,2 mm de diámetro. El límite plástico es el límite inferior de la fase plástica del suelo. La prueba del límite plástico es sencilla y se realiza haciendo rodar manualmente una masa de suelo de tamaño elipsoidal sobre una placa de vidrio esmerilado. El procedimiento para la prueba del límite plástico es el siguiente Designación de prueba ASTM D-4318 (ASTM, 2014).

Como en el caso de la determinación del límite líquido, el método del cono de caída puede ser para obtener el límite plástico. Esto se puede conseguir utilizando un cono de geometría similar, pero con una masa de 2,35 N (240 gf). Se realizan de tres a cuatro pruebas con diferentes contenidos de humedad del suelo y se determinan las correspondientes penetraciones "d" del cono.

El contenido de humedad correspondiente a una penetración de cono de arena de $d = 20$ mm es el límite plástico. La figura 1.27 muestra el límite líquido y el límite plástico determinados por el ensayo de cono de caída para la arcilla Cambridge Gault reportado por Wroth y Wood (1978).

Figura N°07: Límites líquidos y plásticos de la arcilla Cambridge Gault determinados por la prueba del cono de caída.



Nota: Contenido de humedad versus cono de penetración. **Fuente:** Braja Das (2019)

La diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de los suelos es definido por el índice de plasticidad (IP).

$$IP = LL - LP \quad (2.9)$$

donde:

LL= Límite líquido

LP= Límite plástico

Sridharan et al. (1999) mostraron que el índice de plasticidad puede correlacionarse con el índice de fluidez obtenido en los ensayos de límite líquido. Según su estudio.

$$IP(\%) = 4,12I_F(\%) \quad (2.10)$$

$$IP(\%) = 0,74I_{Fc}(\%) \quad (2.11)$$

2.2.3.3 Índice de liquidez

La consistencia relativa de un suelo cohesivo puede definirse mediante una relación denominada el índice de liquidez (IL). Se define como:

$$IL = \frac{w_N - LP}{LL - LP} = \frac{w_N - LP}{IP} \quad (2.12)$$

Donde w_N es el contenido de humedad natural. De la ecuación 2.12 se desprende que, si $w_N = LL$, el índice de liquidez es igual a 1. De nuevo, si $w_N = LP$, el índice de liquidez es igual a 0. Así, para un depósito natural de suelo que se encuentra en estado plástico (es decir, $LL \geq w_N \geq LP$), el valor del índice de liquidez varía entre 1 y 0. Un depósito natural con $w_N \geq LL$ tendrá un índice de liquidez superior a 1. En un estado inalterado, estos suelos pueden ser estables; Sin embargo, un choque repentino puede transformarlos en un estado líquido. Estos suelos se denominan arcillas sensibles.

2.2.3.4 Distribución granulométrica del suelo

Para una comprensión básica de la naturaleza del suelo, es necesario conocer la distribución del tamaño del grano presente en una masa de suelo determinada. La distribución granulométrica de los suelos de grano grueso (grava y/o arena) se determina mediante el análisis granulométrico. La tabla 1.5 indica el tamaño de apertura de algunos tamices de estados unidos (Braja Das, 2019).

El porcentaje acumulado en peso de un suelo que pasa un tamiz determinado se denomina porcentaje de finura. La Tabla 2.3 muestra los resultados de un análisis granulométrico para un suelo arenoso. La distribución granulométrica puede utilizarse para determinar algunos de los parámetros básicos del suelo, como el tamaño efectivo, el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de gradación (Braja Das, 2019).

El tamaño efectivo de un suelo es el diámetro por el que pasa el 10 % de la masa total del suelo y se denomina D_{10} . masa del suelo y se denomina D_{10} . El coeficiente de uniformidad C_u se define como:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.13)$$

donde D_{60} es el diámetro por el que pasa el 60 % de la masa total del suelo.

Tabla N°03: Tamices estándar de EE. UU.

Tamiz N°	Tamaño de apertura(mm)
3	6.35
4	4.75
6	3.36
8	2.38
10	2
16	1.19
20	0.84
30	0.59
40	0.425
50	0.297
60	0.25
70	0.21
100	0.149
140	0.105
200	0.075
270	0.053

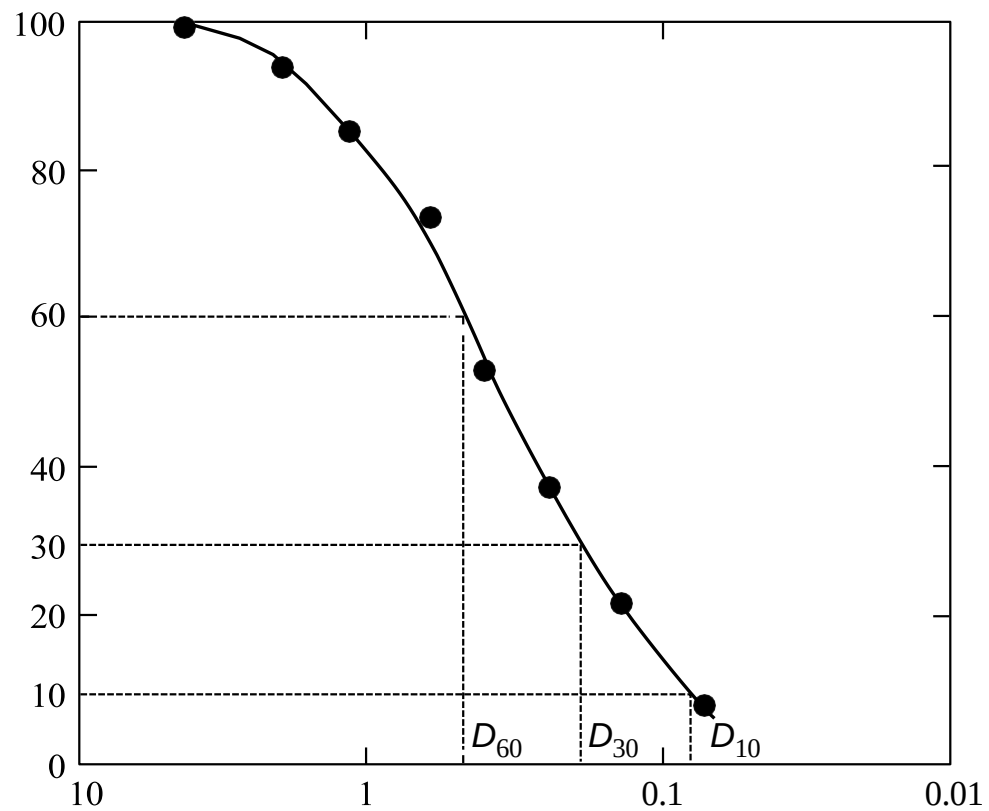
Fuente: Elaboración Propia tomado del manuscrito de Mecánica de suelos avanzado de Braja M. DAS

El coeficiente de gradación C_c se define como:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60})(D_{10})} \quad (2.14)$$

donde D_{30} es el diámetro por el que pasa el 30 % de la masa total del suelo.

Figura N°08: Límites líquidos y de



Nota: Límites líquidos y de caída. **Fuente:** Braja Das (2019)

Según Braja Das (2019) Un suelo se denomina bien graduado si la distribución de los tamaños de grano se extiende en un rango bastante amplio. En ese caso, el valor del coeficiente de uniformidad es grande. En general, se considera que un suelo está bien graduado si C_u es mayor que 4-6 y C_c está entre 1 y 3. Cuando la mayoría de los granos en una masa de suelo tienen aproximadamente el mismo tamaño, es decir, C_u está cerca de 1, el suelo se denomina de baja gradación. Un suelo puede tener una combinación de dos o más fracciones de suelo bien graduado, y este tipo de suelo se denomina suelo de grado medio.

La técnica de análisis granulométrico descrita anteriormente es aplicable a los granos de suelo de tamaño superior al n° 200 (0,075 mm). Para los suelos de grano fino, el procedimiento utilizado para la determinación de la distribución granulométrica es el análisis hidrométrico. Se basa en el principio de la sedimentación de los granos del suelo.

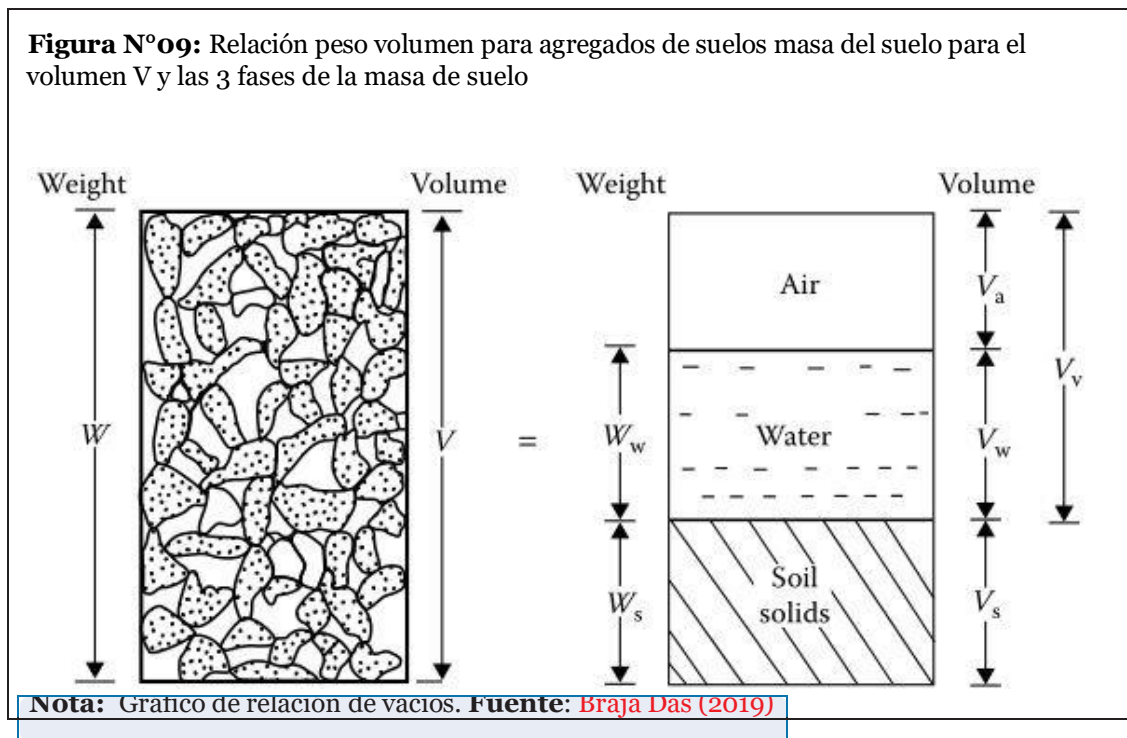
2.2.3.5 Relación peso volumen

muestra una masa de suelo que tiene un volumen total V y un peso total W . Para desarrollar las relaciones peso volumen, las tres fases de la masa de suelo es decir, los sólidos del suelo, el aire y el agua, se han separado en la figura 9.

$$W = W_s + W_w \quad (2.15)$$

$$V = V_s + V_w + V_a \quad (2.16)$$

$$V_v = V_w + V_a \quad (2.17)$$



donde W_s = peso de los sólidos del suelo

W_w = peso del agua

V_s = volumen de los sólidos del suelo

V_w = volumen de agua

V_a = volumen de aire

The weight of air is assumed to be zero. The volume relations commonly used in soil mechanics are void ratio, porosity, and degree of saturation. La relación de vacíos se define

como la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de los sólidos:

$$e = \frac{V_V}{V_S} \quad (2.18)$$

La porosidad n se define como la relación entre el volumen de huecos y el volumen total:

$$n = \frac{V_V}{V} \quad (2.19)$$

Además: $V = V_S + V_V$

$$n = \frac{V_V}{V_S + V_V} = \frac{\left(\frac{V_V}{V_S}\right)}{\left(\frac{V_S}{V_S}\right) + \left(\frac{V_V}{V_S}\right)} = \frac{e}{1 + e} \quad (2.20)$$

El grado de saturación S_r es la relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos y se expresa generalmente en porcentaje:

$$S_r(\%) = \frac{V_w}{V_V} (100) \quad (2.21)$$

Las relaciones de peso utilizadas son el contenido de humedad y el peso unitario. La humedad w se define como la relación entre el peso del agua y el peso de los sólidos del suelo, generalmente expresado en porcentaje:

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} (100) \quad (2.22)$$

El peso unitario γ es la relación entre el peso total y el volumen total del suelo agregado:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2.23)$$

A veces se denomina peso unitario húmedo, ya que incluye el peso del agua y de los sólidos del suelo. Si todo el espacio vacío está lleno de agua (es decir, $V_a = 0$), se trata de un suelo saturado; la ecuación 2.23 nos dará entonces el peso unitario saturado γ_{sat} .

El peso unitario seco γ_d se define como la relación entre el peso de los sólidos del suelo o el volumen total:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (2.24)$$

Las relaciones peso-volumen útiles pueden desarrollarse considerando una masa de suelo en el que el volumen de los sólidos del suelo es la unidad, como se muestra en la figura 10. Dado que $V_s = 1$, a partir de la definición de relación de vacíos dada en la Ecuación 2.18, el volumen de vacíos es igual a la relación de vacíos e . El peso de los sólidos del suelo puede ser dado por: $W_s = G_s \gamma_w V_s = G_s \gamma_w$ Ya que $V_s = 1$

donde:

G_s es el peso específico de los sólidos del suelo γ_w es el peso unitario del agua (9,81 kN/m³)

De la ecuación 2.28, el peso del agua es $W_w = wW_s = wG_s\gamma_w$. Por lo tanto, el peso unitario de la humedad es.

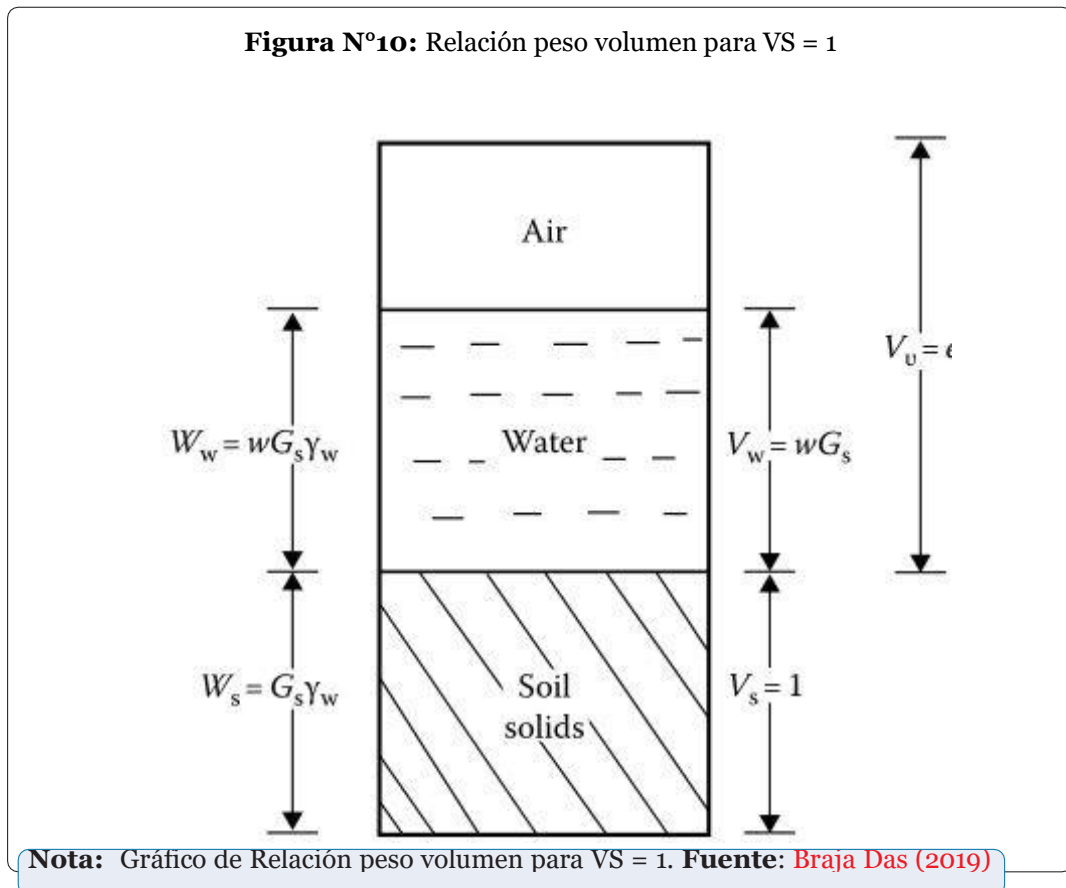
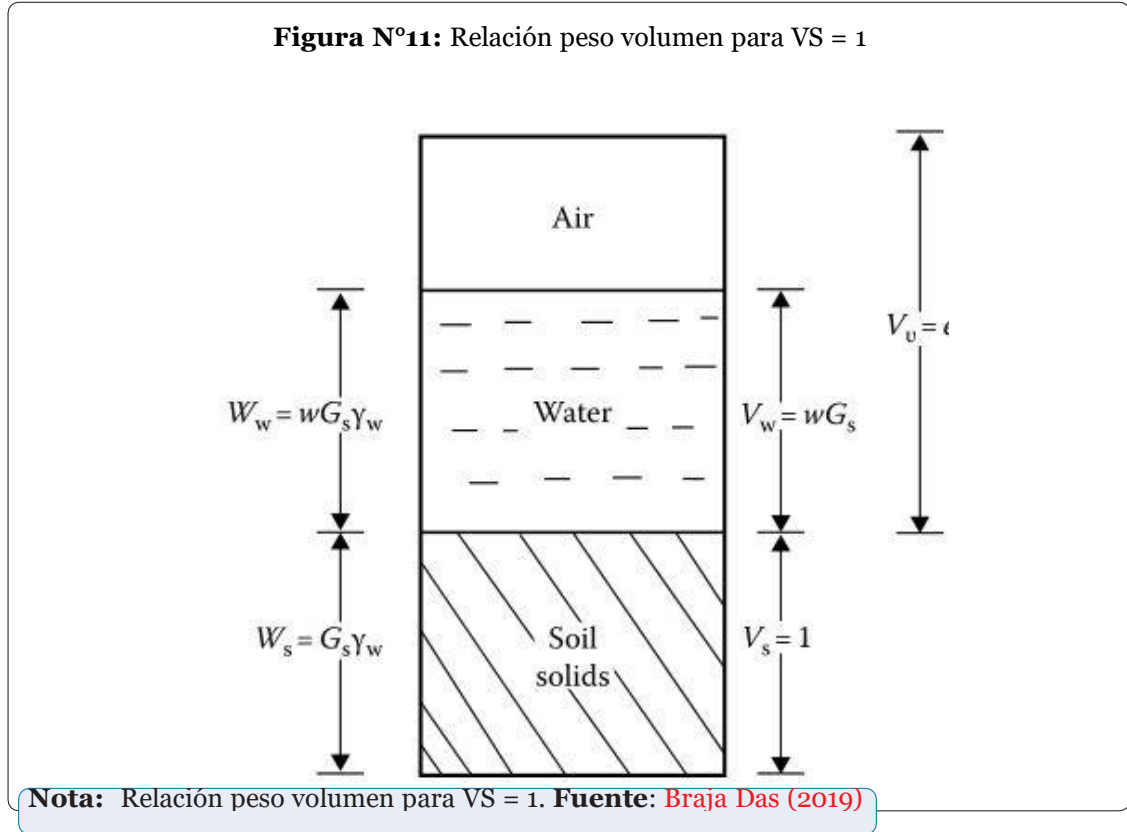


Figura N°11: Relación peso volumen para VS = 1



$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v} = \frac{G_s\gamma_w + wG_s\gamma_w}{1 + e} = \frac{G_s\gamma_w(1 + w)}{1 + e} \quad (2.25)$$

El peso unitario seco también puede determinarse a partir de la figura 10 como

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{G_s\gamma_w}{1 + e} \quad (2.26)$$

El grado de saturación puede venir dado por

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\frac{W_w}{\gamma_w}}{\frac{W_w}{e\gamma_w}} = \frac{wG_s\gamma_w}{e} = \frac{wG_s}{e} \quad (2.27)$$

Para suelos saturados, $S_r = 1$. Así, a partir de la ecuación 2.27

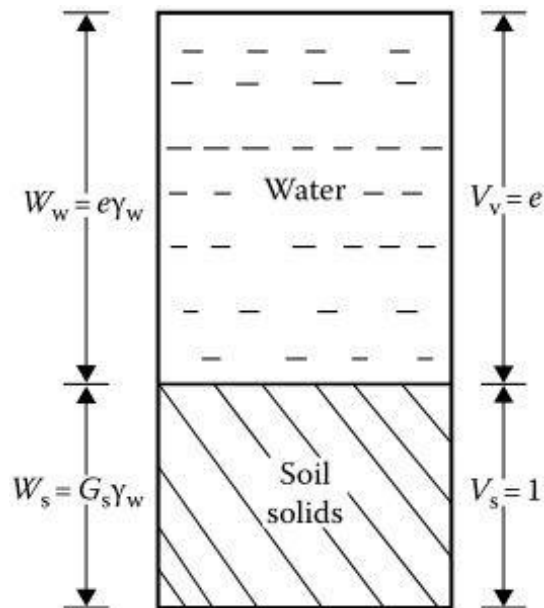
$$e = wG_s \quad (2.28)$$

Si nos referimos a la figura 11, la relación del peso unitario de un suelo saturado puede obtenerse como

$$\gamma_{sat} = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{G_s\gamma_w + e\gamma_w}{1 + e} \quad (2.29)$$

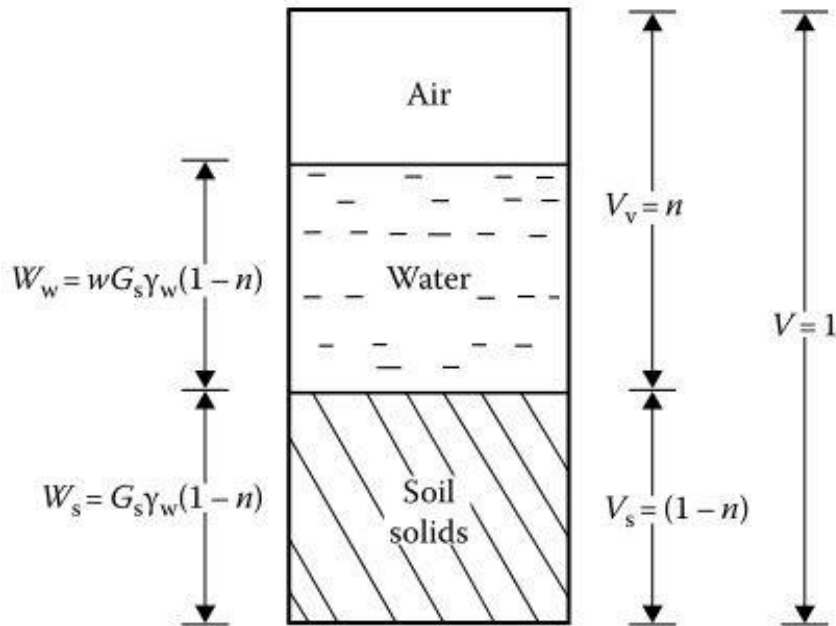
Las relaciones básicas para el peso unitario, como las ecuaciones 2.23, 2.24 y 2.25 en términos de porosidad n también pueden derivarse considerando una masa de suelo que tiene un volumen total de la unidad como se muestra en la Figura 11. En este caso (para $V = 1$), a partir de la Ecuación 2.19, $V_o = n$. Así, $V_s = V - V_v = 1 - n$

Figura N°12: Relación peso volumen para suelo saturado con $V_s=1$



Nota: Relación peso volumen para suelo saturado con $V_s=1$. **Fuente:** Braja Das (2019)

Figura N°13: Relación peso volumen para $V=1$



Nota: Relación peso volumen para $V=1$. **Fuente:** Braja Das (2019)

El peso de los sólidos del suelo es igual a $(1 - n)G_s\gamma_w$, y el peso del agua $W_w = wW_s = w(1 - n)G_s\gamma_w$. Por lo tanto, el peso unitario húmedo es

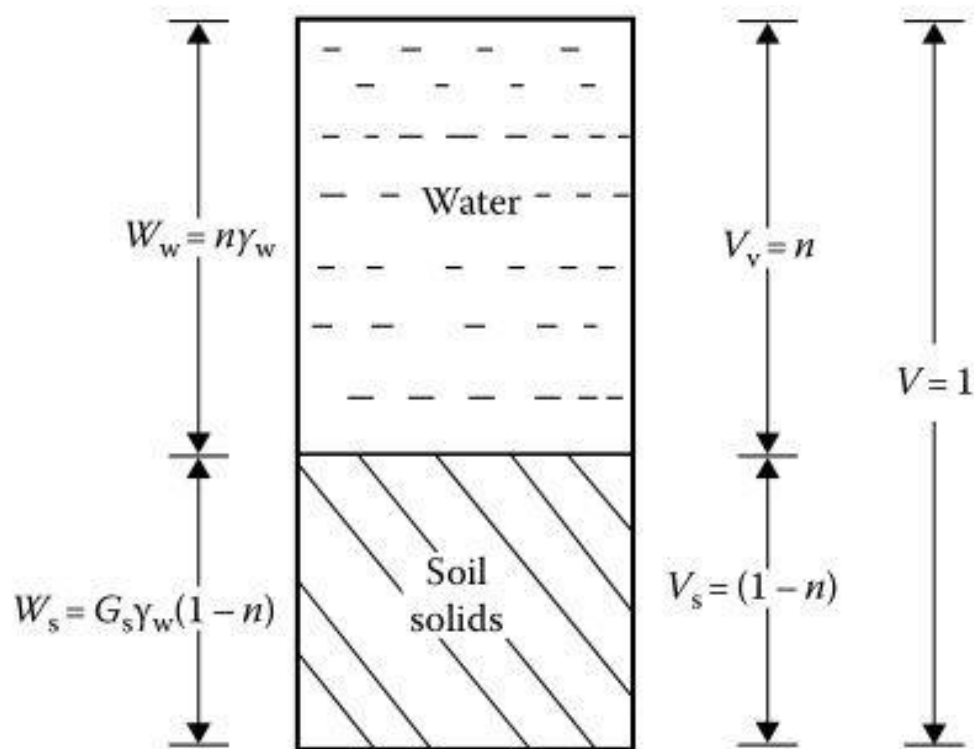
$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{(1 - n)G_s\gamma_w + w(1 - n)G_s\gamma_w}{1} \quad (2.30)$$

$$\gamma = G_s\gamma_w(1 - n)(1 + w)$$

El peso unitario seco es

Si el suelo está saturado

Figura N°14: Relación suelo



Nota: Relación suelo agua. **Fuente:** Braja Das (2019)

Tabla N°04: Relación de vacíos y peso unitario seco.

Tipo de suelo	Relación de vacío e		Pesos unitario seco, Yd	
	Máximo	Mínimo	Mínimo (KN/m ³)	Máximo (KN/m ³)
Grava	0.6	0.3	16	20
Arena gruesa	0.75	0.35	15	19
Arena fina	0.85	0.4	14	19
Arena estándar de Ottawa	0.8	0.5	14	17
Grava arenoso	0.7	0.2	15	22
Limo arenoso	1	0.4	13	19
Limo arenoso y grava	0.85	0.15	14	23

Fuente: Elaboración Propia tomado del manuscrito de Mecánica de suelos avanzado de Braja M. DAS

2.2.3.6 Densidad relativa y compactación relativa

La densidad relativa en términos generales se usa para describir el grado de compactación de los suelos de grano grueso. La densidad relativa D_r es definido como:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (2.32)$$

donde:

$e_{\max}$ es el índice de vacío máximo posible

$e_{\min}$ es el índice de vacío mínimo posible

e es el índice de vacío en el estado natural del suelo

La ecuación 2.32 además puede expresarse en términos del peso unitario seco del suelo:

$$\gamma_d(\max) = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e_{\min}} \quad \text{o} \quad e_{\min} = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d(\max)} - 1 \quad (2.33)$$

similarmente:

$$e_{\max} = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d(\min)} - 1 \quad (2.34)$$

$$e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \quad (2.35)$$

donde $\gamma_d(\max)$, $\gamma_d(\min)$ y γ_d son los pesos unitarios máximos, mínimos y en estado natural del suelo. La sustitución de las ecuaciones 2.33 a 2.35 en la ecuación 2.32 da como resultado

$$D_r = \left[\frac{\gamma_d(\max)}{\gamma_d} \right] \left[\frac{\gamma_d - \gamma_d(\min)}{\gamma_d(\max) - \gamma_d(\min)} \right] \quad (2.36)$$

Según **Braja Das (2019)** La densidad relativa se expresa generalmente en porcentaje. Ha sido utilizada por varios investigadores para correlacionar el ángulo de fricción del suelo, el potencial de licuefacción del suelo, etc. Otro término utilizado ocasionalmente en relación con el grado de compactación de suelos de grano grueso es la compactación relativa, R_c , que se define como:

$$R_c = \frac{\gamma_d}{\gamma_d(\max)} \quad (2.37)$$

$$R_c = \frac{R_0}{1 - D_r(1 - R_0)}$$

donde $R_0 = \frac{\gamma_d(\min)}{\gamma_d(\max)}$ Lee y Singh (1971) revisaron 47 suelos diferentes y dieron la relación

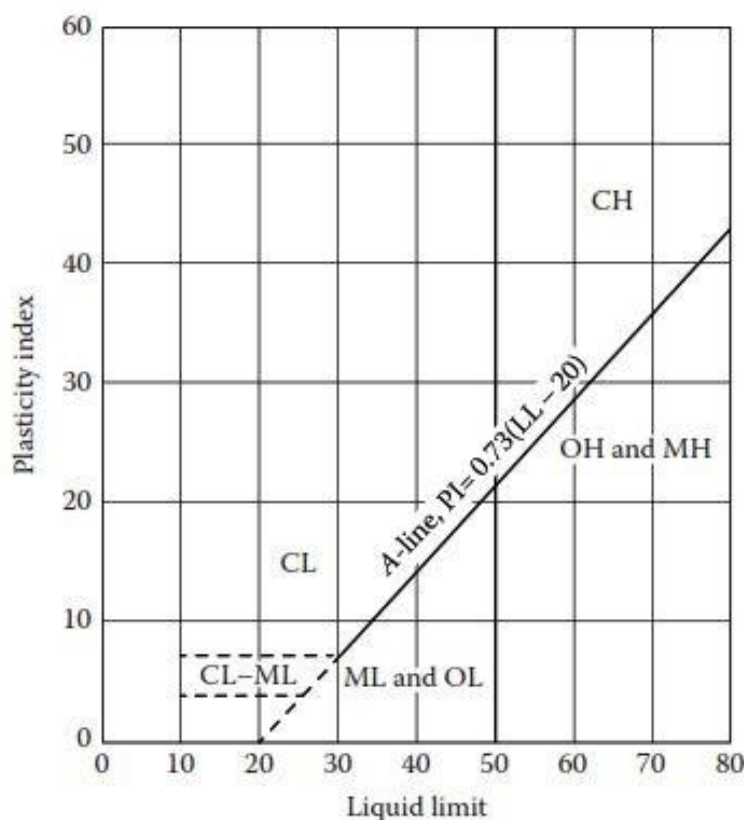
aproximada entre la compactación relativa y la densidad relativa como:

$$R_c = 80 + 0,2D_r \quad (2.38)$$

2.2.3.7 Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)

Según Braja Das (2019) El sistema unificado de clasificación de suelos fue propuesto originalmente por A. Casagrande en 1948 y fue revisado en 1952 por el Cuerpo de Ingenieros y la Oficina de Reclamación de los Estados Unidos. En su forma actual [véase también ASTM D-2487, ASTM (2014)], el sistema es ampliamente utilizado por diversas organizaciones, ingenieros geotécnicos en consultoría privada, y códigos de construcción. Inicialmente, hay dos divisiones principales en este sistema. Un suelo se clasifica como suelo de grano grueso (grava y arena) si más del 50 % es retenido en un tamiz n.º 200 y como suelo de grano fino (limoso y arcilloso) si el 50 % o más pasa por un tamiz n.º 200. El suelo se clasifica a continuación por una serie de subdivisiones, como se muestra en la tabla

Figura N°15: Tabla de



Nota: Tabla de plasticidad. **Fuente:** Braja Das (2019)

De la figura N°13 podemos observar la tabla la clasificación SUCS (sistema unificado de la clasificación de suelos) como se va detallar en la tabla N°04 para los diferentes tipos de suelos donde van contener arena, arcilla, limo, grava y componentes inorgánicos.

Tabla N°05: Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)

Mayor división	Símbolo del grupo	Nombre típico	Criterio o clasificación
Suelo de grano grueso (<50 % pasando el tamiza N°200) Gravas (<50 %de fracción de grueso pasando el tamiz N°4 Grava con pocos o ningún fino)	GW	Gravas bien clasificadas; mezclas de grava y arena (pocos o ningún fino)	$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4 ; C_C = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10})(D_{60})}$ entre 1 y 3
	GP	Gravas mal graduadas; mezclas de grava y arena (pocos o ningún fino)	No reúne los dos criterios para GW
Grava con finos	GM	Grava limosa ; combinación de grava arena y limo	Límites de Atterberg por debajo de la línea A o índice de plasticidad inferior a 4b
	GC	Gravas arcillosas ; combinación de grava , arena y arcilla	Límites de Atterberg por encima de la línea A con índice de plasticidad superior a 7 b
Arena (>50 % de fracción de gruesos que pasa el tamiz N°4 Arenas limpias (pocos o ningún fino)	SW	Arenas bien graduadas; arenas gravosas (pocos o ningún fino)	$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6 ; C_C = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10})(D_{60})}$ entre 1 y 3
	SP	Arenas mal graduadas; arenas gravosas (pocos o ningún fino)	No reúne los dos criterios para SW
Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)	SM	Arenas limosas; mezclas de arena y limo	Límites de Atterberg por debajo de Aline o índice de plasticidad inferior a 4b
	SC	Arenas arcillosas; mezclas de arena y arcilla	Límites de Atterberg por encima de la línea A con índice de plasticidad superior a 7b
Suelos de grano fino (50 % que pasa el N° de tamiz 200)			
Limos y arcilla (límite de líquido	ML	Limos inorgánicos; arenas muy finas	

inferior a 50)		harina de roca; arenas finas limosas o arcillosas
	CL	Arcillas inorgánicas (de baja a media plasticidad) arcillas gravosas; arcillas arenosas; arcillas limosas; arcillas magras
	OL	Limos orgánicos; arcillas orgánicas limosas (baja plasticidad)
Limos y arcilla (límite líquido superior a superior a 50)	MH	Limos inorgánicos; micáceos o diatomeos suelos arenosos o limosos finos; limo elástico
	CH	Arcillas inorgánicas (alta plasticidad) arcillas grasas
	OH	Arcillas orgánicas (de media a alta plasticidad) limos orgánicos
Lodos altamente orgánicos	Pt	Turba; mantillo; y otros suelos altamente orgánicos

Fuente: Elaboración Propia tomado del manuscrito de Mecánica de suelos avanzado de Braja M. DAS

2.2.3.8 Sistema de clasificación AASHTO

Según Braja Das (2019) Este sistema de clasificación de suelos se desarrolló en 1929 como Sistema de Clasificación de la Administración de Carreteras Públicas. Ha sufrido varias revisiones, siendo la versión actual la propuesta por el Comité de Clasificación de Materiales para Subrasantes y Carreteras de Tipo Granular del Highway Research Board en 1945 [ASTM (2014) Designación de prueba D-3282].

El sistema de clasificación de la AASHTO que se utiliza actualmente figura en Tabla 1.10. Según este sistema, el suelo se clasifica en siete grandes grupos: A-1 a A-7. Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde el 35 % o menos de las partículas pasan por el tamiz nº 200. Los suelos en los que más del 35 % pasa por el tamiz nº 200 se clasifican en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. Se trata principalmente de materiales de tipo limo y arcilla. El sistema de clasificación se basa en los siguientes criterios:

1. **Tamaño del grano Grava:** Fracción que pasa el tamiz de 75 mm y se retiene en el nº 10 (2 mm) Tamiz de EE.UU. **Arena:** Fracción que pasa por el tamiz U.S. nº 10 (2 mm) y se retiene en el tamiz U.S. nº 200 (0,075 mm). el tamiz estadounidense nº 200 (0,075 mm) **Limo y arcilla:** Fracción que pasa el tamiz estadounidense nº 200
2. Plasticidad: El término limoso se aplica cuando las fracciones finas del suelo tienen un índice de plasticidad de 10 o menos. El término arcilloso se aplica cuando las fracciones finas tienen un índice de plasticidad de 11 o más.
3. Si se encuentran guijarros y cantos rodados (de tamaño superior a 75 mm), se excluyen de la parte de la muestra de suelo sobre la que se realiza la clasificación. Sin embargo, se registra el porcentaje de dicho material.

Para clasificar un suelo según la Tabla 5, los datos de prueba se aplican de izquierda a derecha. Por el proceso de eliminación, el primer grupo de la izquierda en el que encajen los datos de la prueba es la clasificación correcta.

Para la evaluación de la calidad de un suelo como material de subrasante para carreteras, se incorpora también un número llamado índice de grupo (IG) con los grupos y subgrupos del suelo. El número se escribe entre paréntesis después de la designación del grupo o subgrupo. El índice de grupo viene dado por la ecuación:

$$GI = (F - 35) [0,2 + 0,005 (LL - 40)] + 0,01 (F - 15) (PI - 10) \quad (2.39)$$

F es el porcentaje que pasa el tamiz nº 200

LL es el límite líquido

PI es el índice de plasticidad

El primer término de la ecuación 2.39, es decir, $(F - 35) [0,2 + 0,005(LL - 40)]$ es el índice de grupo parcial determinado a partir del límite líquido. El segundo término, es decir, $0,01(F - 15) (PI - 10)$ es el índice de grupo parcial determinado a partir del índice de plasticidad. A continuación, se indican las reglas para determinar el índice de grupo:

- ☞ Si la ecuación 2.39 da un valor negativo para el IG, se toma como 0.
- ☞ El índice de grupo calculado a partir de la ecuación 2.39 se redondea al número entero más cercano (por ejemplo, $IG = 3,4$ se redondea a 3; $IG = 3,5$ se redondeado a 4).
- ☞ No hay límite superior para el índice de grupo.
- ☞ El índice de grupo de los suelos pertenecientes a los grupos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 y A-3 es siempre 0.
- ☞ Al calcular el índice de grupo para los suelos que pertenecen a los grupos A-2-6 y A-2-7, utilice el índice de grupo parcial para PI, o la ecuación 2.40

$$GI = 0,01 (F - 15) (PI - 10) \quad (2.40)$$

En general, la calidad del rendimiento de un suelo como material de subrasante es inversamente proporcional al índice de grupo.

Tabla N°06: Clasificación de los materiales del subsuelo de las carreteras AASHTO

Materiales granulares (35 % o menos de la muestra total que pasa el tamiz No. 200)							
Clasificación general							
Clasificación de grupo	A-I		A-2				
	A-I-a	A-I-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis granulométrico							
porcentaje que pasa							
N°10	50 máx						
N°40	30 máx	50 máx	50 mín				
N°200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx
Característica de la fracción que pasa							
N°40							
Límite líquido				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad	6 máx		NP	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Tipos habituales de materiales constitutivos	Fragmentos de piedra grava y arena		Finos Arena	Grava y arena limosa o arcillosa			
significativos							
Subrasante general clasificación	De excelente a bueno						
Materiales limo-arcillosos (más del 35 % o del total de la muestra que pasa el tamiz No. 200)							
Clasificación de grupo	A-4		A-5		A-6		A-7
							A-7-5
							A-7-6

Análisis granulométrico

(porcentaje que pasa)

N°10				
N°40				
N°200	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Característica de la fracción que pasa				
N°40				
Límite líquido	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín

Tipos habituales de materiales constitutivos significativos Subrasante general clasificación	Suelo limoso	suelo arcilloso
		Regular a pobre

Fuente: Elaboración Propia tomado del manuscrito de Mecánica de suelos avanzado de Braja M. DAS

2.2.3.9 Compactación

La compactación de los rellenos sueltos es una forma sencilla de aumentar la estabilidad y la capacidad de carga de los suelos, y generalmente se consigue utilizando rodillos de rueda lisa, rodillos de pata de oveja, rodillos con ruedas de goma y rodillos vibratorios. Para redactar las especificaciones de compactación sobre el terreno, Las pruebas de compactación se realizan generalmente en el laboratorio. A continuación se describe brevemente el procedimiento del ensayo de compactación Proctor (Braja Das, 2019):

prueba de compactación Proctor estándar Proctor (1933) desarrolló por primera vez un ensayo estándar de compactación de suelos en laboratorio, que suele denominarse ensayo Proctor estándar (designación ASTM D-698). La prueba se realiza mediante la compactación de tres capas de suelo en un molde de 944 cm³ de volumen. Cada capa de suelo se somete a 25 golpes con un martillo de 24,6 N con una caída de 304,8 mm. A partir del volumen conocido del molde, el peso del suelo compactado húmedo en el molde y el contenido de humedad del suelo compactado, el peso unitario seco de la compactación puede determinarse como

$$\gamma' = (\text{Peso de la tierra húmeda en el molde}) / (\text{volumen del molde})$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma'}{1 + w} \quad (2.41)$$

donde:

γ' = peso unitario húmedo del suelo compactado

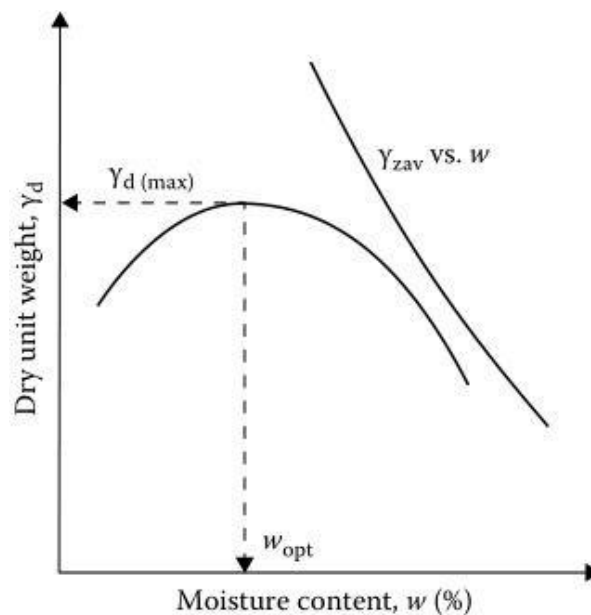
γ_d = peso unitario seco del suelo compactado

w = contenido de humedad del suelo.

La prueba puede repetirse varias veces con distintos contenidos de humedad del suelo. Trazando un gráfico de γ_d frente al contenido de humedad correspondiente, puede obtenerse el contenido de humedad óptimo w_{opt} y el peso unitario seco máximo $\gamma_d(max)$. En la Figura 14 también se representa la variación de los pesos unitarios secos, suponiendo que el grado de saturación es del 100 %. Se trata de los pesos unitarios secos máximos teóricos que pueden alcanzarse para un contenido de humedad determinado cuando no haya aire en los espacios vacíos. Con un grado de saturación del 100 %

$$e = wG_s \quad (2.42)$$

Figura N° 16: Peso unitario seco versus humedad óptima



Nota: Peso unitario seco versus humedad óptima. **Fuente:** Braja Das (2019)

El peso unitario seco máximo con un contenido de humedad determinado y con cero vacíos de aire puede venir dado por la ecuación

$$\gamma_{zav} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + w G_s} = \frac{\gamma_w}{\left(\frac{1}{G_s}\right) + w} \quad (2.43)$$

donde γ_{zav} es el peso unitario sin aire (en seco)

Para la prueba de compactación Proctor estándar, la energía de compactación E puede ser expresada como:

$$E = \frac{\left(\frac{24.5 \text{ N}}{\text{golpe}}\right)(3 \text{ capas})\left(\frac{25 \text{ golpes}}{\text{capa}}\right)(0.3048 \text{ m})}{\frac{944}{10^6} \text{ m}^3} \quad (2.44)$$

$$E = 593.294 \text{ N} - \text{m/m}^3 \approx 593 \text{ kN} - \text{m/m}^3$$

prueba de compactación Proctor modificado Con el desarrollo de equipos de compactación más pesados, el ensayo Proctor estándar se ha modificado para representar mejor las condiciones de campo. En el ensayo Proctor modificado (designación ASTM D-1577), se utiliza el mismo molde que en el ensayo Proctor estándar. Sin embargo, el suelo se compacta en 5 capas, con un martillo de 44,5 N dando 25 golpes a cada capa. La altura de caída del martillo es de 457,2 mm. Por lo tanto, el esfuerzo de compactación en el ensayo Proctor modificado es igual a

Traducción realizada con la versión gratuita del traductor www.DeepL.com/Translator

$$E = \frac{\left(\frac{25 \text{ golpes}}{\text{capa}}\right)(5 \text{ capas})\left(\frac{44.5 \text{ N}}{\text{golpe}}\right)(0.4572 \text{ m})}{\frac{944}{10^6} \text{ m}^3} \quad (2.45)$$

$$E = 2694.041 \text{ N} - \text{m}/\text{m}^3 \approx 2604 \text{ kN} - \text{m}/\text{m}^3$$

El peso unitario seco máximo obtenido en el ensayo Proctor modificado será mayor que el obtenido en el ensayo Proctor estándar debido a la aplicación de una mayor energía de compactación. También irá acompañado de un contenido de humedad óptimo más bajo en comparación con el obtenido en la prueba de compactación Proctor estándar.

2.3 Marco conceptual

2.3.1 Modelamiento de redes neuronales artificiales

La arquitectura de las redes neuronales artificiales se refiere a la composición de los elementos de las redes neuronales, su organización y los parámetros que les afectan. La red neuronal de retropropagación es una de las arquitecturas de redes neuronales más comunes. Esta arquitectura de red neuronal es muy popular porque puede aplicarse a muchas tareas diferentes. La retroalimentación describe cómo esta red neuronal procesa y recuerda patrones. En una red neuronal de avance, las neuronas sólo están conectadas hacia delante. Cada capa de la red neuronal contiene conexiones con la capa siguiente (por ejemplo, desde la entrada a la capa oculta), pero no hay conexiones hacia atrás. La retropropagación describe cómo se entrena este tipo de red neuronal. La retropropagación es una forma de entrenamiento supervisado. Cuando se utiliza un método de entrenamiento supervisado, se debe proporcionar a la red con entradas de muestra y salidas anticipadas, las salidas previstas se comparan con las salidas reales para una entrada determinada a partir de las salidas previstas, el algoritmo de entrenamiento por retropropagación toma un error calculado y ajusta los pesos de las capas hacia atrás desde la capa de salida hasta la capa de entrada, y la mayoría de las redes neuronales tienen las funciones principales de procesamiento de peso, suma y paso de la salida de sus capas a través de funciones de activación (transferencia) donde estas funciones de activación escalan la salida de la red neuronal en rangos adecuados de valores máximos y mínimos donde hay un total de tres tipos de funciones de activación (Gohary et al. 2017).

como son:

☞ Tangente hiperbólica

☞ sigmoidal

☞ lineal

utilizaron tanh en sus modelos de redes neuronales. También probaron la función sigmoidea, la función lineal y otras funciones disponibles en un programa informático NeuroSolution 4, varias veces, produciendo resultados menos precisos; el El algoritmo de aprendizaje utilizado para todas las redes neuronales fue el algoritmo de aprendizaje de retropropagación en el que cada capa alimenta directamente a la capa siguiente. En este estudio, el programa comercial programa informático comercial NeuroSolution 6.03 para desarrollar, entrenar y probar las redes neuronales. La función de activación (transferencia) utilizada en todas las redes neuronales fue tanh, que se representa (Gohary et al. 2017)

$$f(x) = \frac{e^{2x}-1}{e^{2x}+1} \quad (2.46)$$

El error cuadrático medio es:

$$MSE = \frac{\sum_p \sum_{j=1}^p \cdot \sum_{i=1}^n (d_{ij} - y_{ij})^2}{NP} \quad (2.47)$$

donde:

p= número de elementos de procesamiento de salidas

N= número de ejemplos en el conjunto de datos

d_{ij}= salida deseada

y_{ij}= salida actual

El promedio de MSE para todos los modelos de diferentes oficios se muestra en Tabla 1. La red entrenada se considera aceptable para predecir la productividad con un margen de error satisfactorio. No existe un método específico para determinar el número de capas ocultas y el número de nodos en cada capa. sugirieron empezar con una capa oculta y luego aumentar a dos capas ocultas si el rendimiento con una capa oculta es no es satisfactoria. En general, un número reducido de nodos ocultos dará lugar a un elevado error de entrenamiento y predicción (prueba) porque la red es incapaz de aprender la función. Por otro lado, demasiados nodos ocultos resultará en un bajo error de entrenamiento y un aumento de la potencia de la red, pero requerirá más cálculos y probablemente producirá un problema de producir un problema de sobreajuste(Gohary et al. 2017).

Por lo tanto, la mejor arquitectura de red para un problema específico podría lograrse utilizando el enfoque de prueba y error. En esta investigación, el número de entradas es de 29, y la suma de errores al cuadrado se define como inferior a 0,001. Por lo tanto, una

capa oculta y 20 neuronas en la capa oculta. Esto coincide con Gohary et al. (2017), que determinaron el número de neuronas de la capa oculta como $2=3$ o el 70-90 % del tamaño de la capa de entrada. En la capa de salida se utiliza una neurona que se denomina k. La Fig. 2 muestra la arquitectura de la red utilizada. Es importante dividir el conjunto de datos en conjuntos de entrenamiento y de prueba (predicción). El conjunto de datos de entrenamiento es responsable del proceso de aprendizaje de la red. El conjunto de datos de prueba, sin embargo, tiene datos que la red no ha utilizado en sus cálculos de entrenamiento. Los datos de prueba miden la capacidad de generalización de la red. No hay ninguna regla que dicte qué porcentaje se asigna exactamente al conjunto de entrenamiento y al conjunto de pruebas. Sin embargo, es importante tener suficientes datos de para que la red converja. El proceso de entrenamiento y prueba es dinámico y continuo, lo que significa que con la disponibilidad de más datos, se pueden realizar más entrenamientos y pruebas. Gohary et al. (2017) afirmaron que "para determinar una cantidad adecuada de datos de entrenamiento y prueba, se consideraron dos divisiones. La primera fue el 90 % de los datos para el entrenamiento y el 10 % para las pruebas. La segunda fue 50 % de los datos para el entrenamiento y 50 % para las pruebas. Tras las pruebas iniciales se vio que los resultados de la primera división eran más precisos". En otro caso, Heravi y Eslamdoost (2015) asignaron el 70 % de los datos para el entrenamiento del modelo. En este estudio, se realizó una división del 75 % de los datos para el entrenamiento y el 25 % para las pruebas. El algoritmo de aprendizaje en la red neuronal de retropropagación tiene dos fases. En primer lugar, la capa de entrada recibe un patrón de entrenamiento de entrada y la red propaga (feedforward) el patrón de entrada de capa a capa hasta que la capa de salida genera el patrón de salida. Una neurona calcula la entrada ponderada de la red basándose en la siguiente ecuación. (Gohary et al. 2017)

$$X = \sum_{i=1}^n x_i w_i - \alpha \quad (2.48)$$

donde:

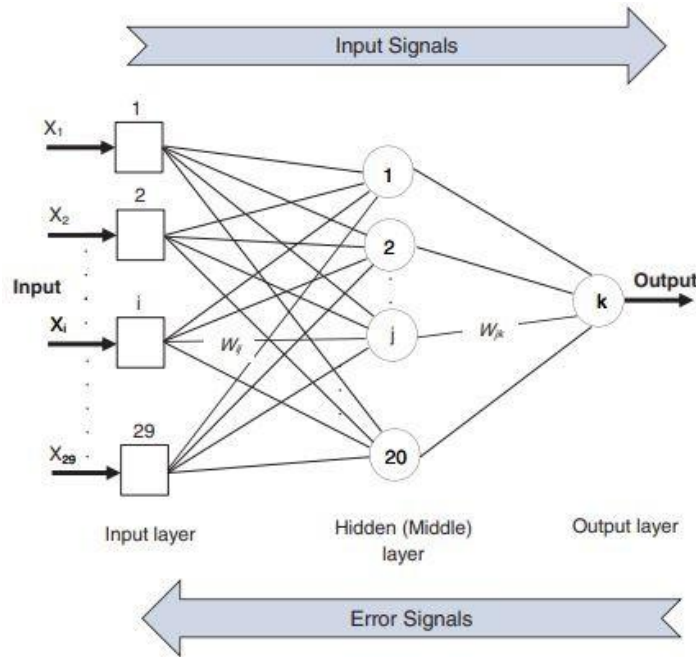
n= número de entradas

α =Límites aplicado a la neurona

A continuación, este valor se pasa por la función de activación. En segundo lugar, si este patrón es diferente de la salida deseada se calcula el error correspondiente y se propaga hacia atrás (back-propagation) a través de la red desde la capa de salida hasta la capa de entrada. A continuación, los pesos de la red de retropropagación se actualizan con los errores asociados de la neurona de salida y se se propagan hacia atrás. (Gohary et al. 2017).

La señal de error en la salida de la neurona k (capa de salida) en la iteración p se define como:

Figura N°17: Arquitectura de 3 capas de feed forward con algoritmo de aprendizaje de backpropagation



Nota: Entradas a la red neuronal. **Fuente:** Khaled Mahmond

$$e_k(p) = Y_{d,k}(p) - Y_k(p) \quad (2.49)$$

donde:

$Y_{d,k}(p)$ = salida deseada de la neurona k en la iteración p;

$Y_k(p)$ = salida calculada pertinente de la neurona k utilizando la función de activación función de activación utilizada (tanh). El peso w_{jk} se actualiza mediante:

$$w_{jk}(p + 1) = w_{jk}(p) + \Delta w_{jk}(p) \quad (2.50)$$

donde:

$\Delta w_{jk}(p)$ = corrección del peso. Como la salida de la capa anterior (por ejemplo, la capa oculta) se utiliza como entrada a la siguiente capa (por ejemplo, la capa de salida), $\Delta w_{jk}(p)$ se define como:

$$\Delta w_{jk}(p) = \theta \times Y_j(p) \times \delta_k(P) \quad (2.51)$$

donde:

θ = tasa de aprendizaje, una constante positiva menor que la unidad; y $\delta_k(P)$ = gradiente de error en la neurona k. El gradiente de error se determina como la derivada de la función de activación multiplicada por el error a la salida de la neurona. Para la neurona k en la capa de salida.

$$\delta_k(P) = \frac{\delta_{yk}(P)}{\delta_{xi}(P)} \times e_k(p) \quad (2.52)$$

donde:

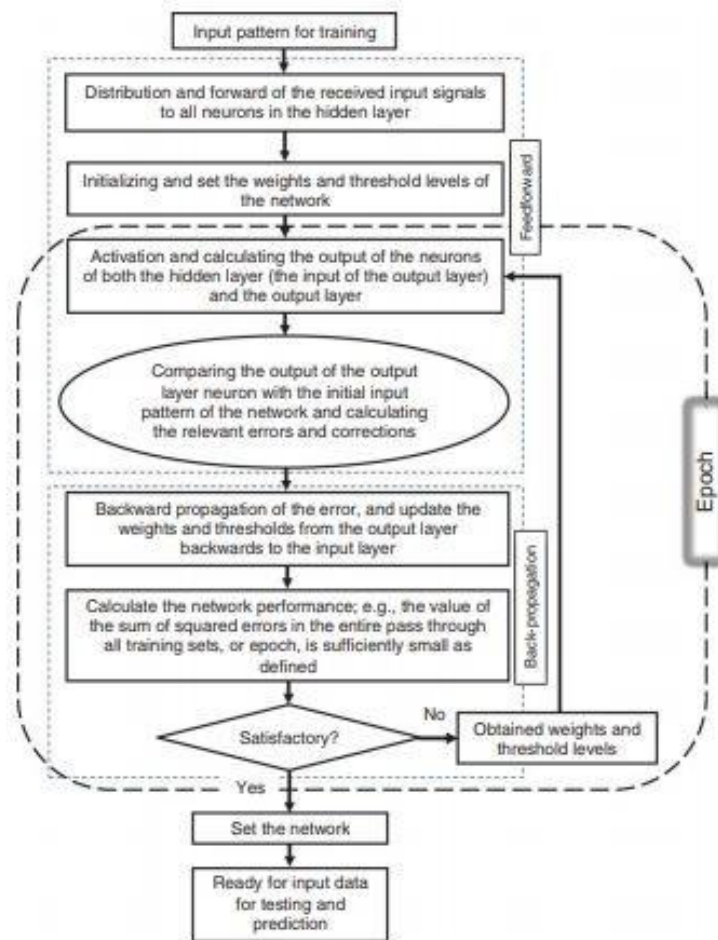
$Y_k(p)$ = salida de la neurona k en la iteración p; y $X_k(p)$ = entrada neta entrada ponderada a la neurona k en la misma iteración. La Fig. 2.16 muestra el proceso utilizado para el entrenamiento y la predicción (validación) de la red.

2.3.1.1 Prueba de modelo de productividad y validación

Según Gohary et al. (2017):

Después de que la red se entrene durante el número de épocas designado, la red congela los pesos que ha alcanzado. Cuando el sobreajuste y el error de validación comienza a aumentar para un número determinado de épocas, la prueba se detiene y se devuelven los parámetros correspondientes al mínimo de este error de validación.(p.6)

Figura N°18: Diagrama de flujo para redes neuronales



Nota: Diagrama de flujo para redes neuronales artificiales. **Fuente:** Khaled Mahmond

III

MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Enfoque.

La investigación se realizará con un enfoque Cuantitativo se podrá operar con cifras el valor de los rendimientos.

3.2 Alcance

La investigación se realizará con un enfoque de alcance descriptivo para estimar los parámetros de compactación a partir de los parámetros de clasificación de los suelos y los límites de Atterberg donde realizaremos la operacionalización de variables con sus indicadores para el ingreso a la red neuronal artificial.

3.3 Diseño de investigación

El diseño es transversal porque se va recolectar y procesar datos en un solo momento de la investigación de la investigación y no en varios momentos, a esta investigación también se le conoce como transeccional.

3.4 Población y muestra

3.4.1 Población

3.4.2 Son todos los resultados de laboratorio de densidad seca y humedad óptima de las muestras de diferentes tipos de suelos de la región geológica de Ayacucho. Muestra

El muestreo no probabilístico discreto de los resultados de laboratorio de densidad seca y humedad óptima del proyecto de pavimentación de la av. ejército de Andrés Avelino Cáceres Ayacucho, 2021.

3.5 Hipótesis

3.5.1 Hipótesis general

Con el uso de RNA se puede estimar los parámetros de compactación y resistencia de soporte en suelos de subrasante utilizando redes neuronales artificiales supervisadas en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021.

3.5.2 Hipótesis específicas

1. Con el uso de RNA se puede estimar parámetros de compactación y resistencia de soporte en suelos de subrasante a partir de la granulométrica de la Av. Ejército Ayacucho, 2021
2. Con el uso de RNA se puede estimar parámetros de compactación y resistencia de soporte en suelos de subrasante a partir de los límites de consistencia de la Av. Ejército Ayacucho, 2021.
3. Con el uso de RNA se puede estimar parámetros de compactación en suelos de subrasante a partir de la clasificación de suelos SUCS Y ASSTHO de la av. Ejército Ayacucho, 2021.

3.6 Operacionalización de variables

3.6.1 Variables e indicadores

La operacionalización de variables se muestra a continuación en la siguiente tabla:

Tabla N°07: Variables e Indicadores.

Independiente	Indicadores	Medición
Parámetros de entrada a la red Neuronal Artificial	Límite líquido (LL)	LL
	Límite Plástico (LP)	LP
	Índice de plasticidad (IP)	IP
	finos	%
	gravas	%
	arena	%
	Clasif. ASSHTO	G,S ó C
	Clasif. SUCS	G,S ó C
dependiente	Indicadores	Medición
Parámetros de Compactación	Densidad seca(γ_d)	$\frac{gr}{cm^3}$
	Humedad óptima(w_{opt})	%

Fuente: Elaboración Propia

3.7 Técnicas e instrumentos

3.7.1 Técnicas

- ☞ La técnica de la observación
- ☞ La técnica documental de datos
- ☞ La técnica del procesamiento de datos

3.7.2

Instrumentos

- ☞ Guía de observación.
- ☞ Paper y libros de investigación.
- ☞ Instrumento de la recolección de datos.

3.8 Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información

Según Hernández Sampieri y José Supo investigadores reconocidos en metodología de la investigación en América Latina nos mencionan que las investigaciones de Nivel descriptivo no tienen contrastación de hipótesis y por lo tanto la herramienta a utilizar es la estadística descriptiva para la obtención de los parámetros estadísticos como la media, mediana, moda, desviación estándar, etc., y que solamente las investigaciones de nivel superior a la descriptiva tenían como instrumento el uso de la estadística Inferencial probabilística y estocástica para la contrastación de hipótesis, por lo que para la presente investigación es opcional la Contrastación de hipótesis.

Los métodos estadísticos de contrastación de hipótesis son los siguientes:

1. Formulación de hipótesis: Tenemos la Hipótesis nula (H_0), es una afirmación inicial que se quiere contrastar o probar y tenemos la hipótesis alternativa (H_1 o H_a), representa la afirmación que se busca respaldar con evidencia es lo contrario a la hipótesis nula.
2. Selección de nivel de significancia (α), El nivel de significancia denotado por α establece el límite para rechazar la hipótesis nula comúnmente se utiliza un valor de 0.05 o 0.01.
3. Selección de Prueba estadística: La elección de la prueba estadística depende de la naturaleza de los datos y la hipótesis como pueden ser la prueba de t de Student, Prueba Z, prueba Chi-Cuadrado, Prueba F, etc.
4. Recopilación y Análisis de Datos: Se recopilan los datos relevantes para la prueba y se realiza el análisis estadístico apropiado según la prueba seleccionada.
5. Cálculo del valor P: El valor p es la probabilidad de obtener los resultados observados si la hipótesis nula es verdadera. Si el valor de p es menor que el nivel de significancia (α), se rechaza la hipótesis nula.
6. Toma de decisión: Si el valor p es menor que α , se rechaza la hipótesis nula a favor de la alternativa. Si es mayor, no se tiene evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula.
7. Interpretación de los resultados: Se interpreta la significancia estadística en el contexto del problema y se extraen conclusiones Es importante señalar que la no significancia estadística no implica que la hipótesis nula sea verdadera; simplemente significa que no hay suficiente evidencia para rechazarla con los datos disponibles.

.

Contrastación de Hipótesis con PROGRAMA SPSS

Para La densidad máxima seca

Resumen del modelo para la densidad máxima seca

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	Change Statistics			Sig. F Change
						F Change	df1	df2	
1	,178 ^a	,032	,016	,22553	,032	2,005	8	489	,044

a. Predictors: (Constant), SUCS, LÍMITE_PLÁSTICO, GRAVA, ARENA, INDICE_PLASTICIDAD, AASTHO, LIMITE_LIQUIDO, FINOS

b. Dependent Variable: DENS.MAXIMA

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	,816	8	,102	2,005	,044 ^b
	Residual	24,873	489	,051		
	Total	25,689	497			

a. Dependent Variable: DENS.MAXIMA

b. Predictors: (Constant), SUCS, LÍMITE_PLÁSTICO, GRAVA, ARENA, INDICE_PLASTICIDAD, AASTHO, LIMITE_LIQUIDO, FINOS

En la tabla ANOVA podemos observar el valor de la prueba F aceptable donde tenemos un nivel de significancia aceptable de 4.4%.

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	1,858	,819		2,269	,024	,249	3,467
	LIMITE_LIQUIDO	-,010	,015	-,404	-,675	,500	-,041	,020
	LÍMITE_PLÁSTICO	,016	,015	,375	1,065	,287	-,014	,046
	INDICE_PLASTICIDAD	,007	,016	,183	,457	,648	-,024	,038
	GRAVA	-,005	,008	-,440	-,582	,561	-,020	,011
	ARENA	-,005	,008	-,315	-,683	,495	-,021	,010
	FINOS	-,005	,008	-,604	-,690	,490	-,021	,010
	AASTHO	,013	,011	,079	1,148	,251	-,009	,035
	SUCS	,000	,000	,082	1,803	,072	,000	,001

a. Dependent Variable: DENS.MAXIMA

Como se puede apreciar la contrastación de hipótesis de las variables de entrada para la densidad seca máxima, los coeficientes de la regresión lineal múltiple, donde también se puede apreciar el t-student para cada variable y el nivel de significancia para cada variable independiente del modelo es aceptable para todos los Sig. Según el T student teórico como se observa en la tabla de coeficientes, lo cual nos indica que se puede utilizar el modelo de redes neuronales para predecir resultados estimados.

Contrastación de hipótesis para el contenido de humedad óptimo

ANOVA^a

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	251,994	8	31,499	,795	,607 ^b
	Residuo	19375,329	489	39,622		
	Total	19627,323	497			

a. Variable dependiente: CONTENIDO_HUMEDAD

b. Predictores: (Constante), SUCS, LÍMITE_PLÁSTICO, GRAVA, ARENA, INDICE_PLASTICIDAD, AASTHO, LIMITE_LIQUIDO, FINOS

Coeficientes^a

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	95.0% intervalo de confianza para B	
		B	Desv. Error	Beta			Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	-21,530	22,857		-,942	,347	-66,441	23,380
	LIMITE_LIQUIDO	,234	,432	,327	,541	,589	-,616	1,084
	LÍMITE_PLÁSTICO	-,279	,427	-,233	-,654	,513	-1,117	,559
	INDICE_PLASTICIDAD	-,207	,440	-,190	-,469	,639	-1,071	,658
	GRAVA	,342	,216	1,208	1,581	,115	-,083	,767
	ARENA	,372	,216	,802	1,722	,086	-,052	,797
	FINOS	,341	,216	1,397	1,582	,114	-,082	,764
	AASTHO	-,007	,317	-,001	-,021	,983	-,630	,617
	SUCS	-,003	,004	-,029	-,637	,524	-,010	,005

a. Variable dependiente: CONTENIDO_HUMEDAD

Como se puede apreciar la contrastación de hipótesis utilizando coeficientes de la regresión lineal múltiple, donde también se puede apreciar el t-student para cada variable y el nivel de significancia para cada variable independiente del modelo es aceptable para todos los Sig. Según el T student teórico como se observa en la tabla de coeficientes para la variable de salida como es el contenido de humedad óptimo.

3.9 Desarrollo de la investigación

Para el desarrollo de la tesis se recolectó los datos de laboratorio para los resultados de los Próctor, previo resultado se obtuvo los datos para los límites de Attemberg y los parámetros de clasificación de los suelos.

3.9.1 Simbología de los tipos de suelos según SUCS y AASHTO

Para el ingreso a la red neuronal se necesitan normalizar los datos de entrenamiento, validación y prueba por lo que los resultados para el tipo de suelos según SUCS y AASHTO son reemplazados por valores numéricos y luego normalizados para el aprendizaje de la red neuronal.

bla N°o8: Simbologia para la normalización e ingreso a la red

Ingreso a la red	SUCS	Ingreso a la red	AASHTO
1	GW	20	A-1
2	GP	21	A-3
3	GM	22	A-2-4
4	GC		A-2-5
5	SW		A-2-6
6	SP		A-2-7
7	SM	23	A-4
8	SC		A-5
9	ML	24	A-6
10	CL		A-7
11	OL		A-7-5
12	MH		A-7-6
13	CH		

14	OH
15	PT

Fuente: Elaboración Propia con hojas de cálculos

3.9.2 Normalización de datos

Para la normalización de los datos se necesitan conocer los parámetros estadísticos como la media, mínimo, máximo y desviación estándar de los valores originales para la obtención de los valores normalizados según las fórmulas descritos debajo.

Tabla N°09: Valores estadísticos de los parámetros de ingreso

Estadística	N° de datos	Media	Mínimo	Máximo
Límite liquido	500.00	32.26	14.78	65.14
Límite plástico	500.00	21.47	9.85	43.59
Índice de plasticidad	500.00	10.83	2.92	36.59
% Grava	500.00	88.21	0.00	176.42
% Arena	500.00	31.73	1.04	73.48
% fina	500.00	36.14	0.64	95.97
Máx. Densidad	500.00	1.74	1.15	2.45
Humed. Óptimo	500.00	14.95	1.13	28.77

Fuente: Elaboración Propia con hojas de cálculo

Fórmulas para la normalización de los valores originales Las fórmulas descritas debajo se utilizan para la normalización de los valores originales en valores normalizados para el ingreso a la red, ya que la función de activación del logaritmo sigmoidal y tangencial solo permite valores entre los rangos de -1 a 1 y de 0 a 1 para su convergencia por lo que es necesario normalizar los datos a procesar como se observa las fórmulas siguientes la normalización son realizadas utilizando las siguientes fórmulas.

$$X_{\text{norm}} = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (\text{III.1})$$

$$X_{\text{norm}} = \frac{x - \text{mean}(x)}{\text{std}(x)} \quad (\text{III.2})$$

En las tablas 3.4 y 3.5 se observan los valores originales y normalizados de todos los datos ingresado a la red neuronal artificial.

Tabla N°10: Parámetros o valores ingresados a la red neuronal artificial

Límite líquido	Límite plástico	Indice plasticidad	% Grava	% Arena	% fina	AASTHO_N	SUCS_N	Máx. Dens. Seca	Humedad Óptima
33.94	20.62	13.32	47.80	30.90	47.80	22.00	8.00	1.60	22.45
41.16	22.21	18.95	16.10	49.04	34.86	24.00	4.00	1.79	9.75
41.08	23.03	18.05	13.04	37.17	49.79	22.00	8.00	1.53	16.30
26.79	19.37	7.42	12.60	45.18	42.22	24.00	8.00	1.44	19.49
38.05	29.36	8.69	13.38	46.04	40.57	22.00	8.00	2.11	8.40
34.28	26.31	7.97	28.78	24.68	46.55	24.00	4.00	1.74	18.50
35.18	24.50	10.68	34.65	38.17	27.18	22.00	8.00	1.69	17.05
30.27	21.60	8.67	41.03	46.71	12.26	22.00	7.00	2.14	6.85
27.07	19.58	7.49	58.74	35.90	5.36	22.00	1.00	2.03	7.35
27.14	23.35	3.80	38.09	52.43	9.48	20.00	6.00	2.03	7.35
30.49	21.97	8.51	0.00	29.15	70.85	24.00	9.00	2.04	8.72
30.88	22.45	8.43	0.39	32.36	67.25	24.00	10.00	1.55	21.96
38.68	28.26	10.43	0.00	22.55	77.45	23.00	10.00	1.33	42.00
33.92	25.26	8.66	0.16	35.20	64.64	23.00	9.00	2.17	4.37
31.20	20.83	10.37	0.07	29.76	70.17	23.00	10.00	2.01	6.88
33.03	26.95	6.07	0.88	43.39	55.74	24.00	10.00	2.18	6.24
64.14	32.42	31.72	63.51	30.12	6.37	22.00	2.00	1.89	10.85
34.22	28.32	5.91	19.24	43.05	37.71	24.00	8.00	1.99	9.18
31.04	23.87	7.18	55.83	37.97	6.20	22.00	2.00	1.90	7.85
28.06	19.45	8.71	59.16	34.58	6.25	22.00	1.00	1.89	10.85
29.98	21.76	8.23	66.65	29.94	3.41	22.00	1.00	1.99	9.18
19.37	13.88	5.49	11.48	30.93	57.60	23.00	10.00	1.90	7.85
26.17	18.86	7.32	59.52	25.05	15.44	22.00	4.00	2.10	8.65
30.72	19.20	11.62	49.14	17.77	33.09	22.00	4.00	1.60	22.45
26.80	18.14	7.66	0.00	7.09	92.91	24.00	10.00	1.79	9.75
36.59	29.28	7.30	62.50	18.43	19.07	22.00	4.00	1.53	16.30
37.10	28.58	8.52	2.90	14.28	82.82	24.00	9.00	1.44	19.49
25.60	19.96	5.63	16.06	49.96	33.98	22.00	8.00	1.99	7.47
23.78	15.88	7.90	58.26	25.78	15.96	22.00	4.00	1.51	19.05
28.16	19.45	8.71	28.20	47.85	23.95	22.00	7.00	1.53	25.70
29.98	21.76	8.23	34.22	47.78	18.00	22.00	7.00	1.44	19.49
23.78	15.88	7.90	26.84	54.36	18.80	22.00	7.00	1.53	16.30

23.40	15.62	7.77	5.94	64.52	29.53	22.00	7.00	1.79	9.75
42.64	23.25	19.39	25.91	64.06	10.03	20.00	5.00	1.60	22.45
31.78	23.06	8.72	46.08	37.27	16.65	22.00	3.00	2.10	8.65
41.67	20.09	21.59	20.65	44.29	35.06	24.00	8.00	1.64	18.51
52.31	27.65	24.66	4.62	41.57	53.81	24.00	10.00	1.65	20.09
50.48	28.78	21.70	0.00	17.31	82.63	24.00	13.00	1.64	21.28
41.97	21.79	20.18	0.16	35.20	64.64	23.00	10.00	2.17	4.37
43.21	27.40	15.81	0.06	17.31	82.63	24.00	13.00	1.53	25.70
39.39	32.67	6.72	0.16	35.20	64.64	23.00	10.00	1.51	19.05
39.94	25.52	14.42	0.07	29.76	70.17	23.00	9.00	1.99	7.47
43.53	29.21	14.32	0.88	43.39	55.74	23.00	10.00	1.64	18.51
39.21	27.99	11.22	58.97	29.25	11.78	22.00	2.00	1.65	20.09
40.41	24.09	16.33	59.17	30.37	10.46	22.00	2.00	1.64	21.28
14.78	9.85	4.93	69.32	25.10	5.57	20.00	1.00	2.05	6.33
25.47	19.47	6.00	64.12	28.04	7.83	22.00	2.00	1.53	16.30
25.11	19.38	5.73	45.68	44.29	10.03	22.00	2.00	1.44	19.49
21.27	17.14	4.13	49.69	40.64	9.67	22.00	4.00	1.45	34.63
32.47	26.54	5.93	27.34	61.59	11.07	22.00	5.00	1.45	34.63
26.08	19.71	6.38	7.69	69.62	22.69	22.00	7.00	1.60	22.45
23.79	18.29	5.51	13.58	68.19	18.23	22.00	7.00	1.53	16.30
22.64	17.48	5.16	22.54	61.34	16.12	22.00	7.00	1.44	19.49
25.50	18.96	6.53	45.84	34.21	19.94	22.00	3.00	2.06	7.54
21.27	17.14	4.13	41.41	36.75	21.84	22.00	3.00	1.94	6.60
23.38	18.53	4.85	0.06	4.19	95.76	24.00	10.00	1.43	19.89
24.14	18.96	5.18	3.09	16.35	80.56	24.00	10.00	2.17	4.37
25.56	20.96	4.60	0.29	9.38	90.33	24.00	9.00	2.10	8.65
21.60	17.15	4.46	0.30	12.47	87.22	24.00	10.00	1.60	22.45
14.78	9.85	4.93	25.83	26.62	47.55	24.00	8.00	1.56	18.00
21.27	17.14	4.13	5.30	27.26	67.44	24.00	10.00	1.75	12.56
32.47	26.54	6.93	56.47	29.80	13.73	22.00	3.00	1.86	8.07
26.08	19.71	6.38	49.18	30.15	20.67	22.00	3.00	1.53	16.30
23.79	18.29	5.51	47.45	32.72	19.83	22.00	3.00	1.44	19.49
22.64	17.48	5.16	0.35	3.68	95.97	24.00	31.00	2.08	7.02
25.50	18.96	6.53	0.00	7.73	92.27	24.00	10.00	1.94	6.60
21.27	17.14	4.13	0.41	4.85	94.73	24.00	13.00	1.43	19.89

23.38	18.53	4.85	0.00	17.27	82.73	24.00	10.00	2.00	9.80
24.14	18.96	5.18	0.00	12.58	87.42	24.00	9.00	1.30	30.34
25.56	20.96	4.60	9.12	23.31	67.57	23.00	10.00	1.48	25.77
21.60	17.15	4.46	51.12	20.61	28.27	22.00	4.00	1.44	27.60
24.86	19.89	4.97	39.52	31.41	29.07	22.00	4.00	2.17	4.37
33.94	20.62	13.32	0.23	21.91	77.86	24.00	10.00	1.70	13.40
41.16	22.21	18.95	5.21	19.81	74.94	24.00	9.00	2.01	10.60
41.08	23.03	18.05	38.94	11.75	49.32	24.00	3.00	1.84	16.09
26.79	19.37	7.42	66.01	25.21	8.78	20.00	2.00	1.71	23.14
38.05	29.36	8.69	51.29	41.38	7.33	20.00	1.00	1.69	21.18
34.28	26.31	7.97	40.25	52.11	7.65	20.00	6.00	1.73	17.57
35.18	24.50	10.68	42.55	33.81	23.64	22.00	4.00	1.77	21.28
30.27	21.60	8.67	24.52	45.78	29.70	22.00	7.00	1.90	11.82
27.07	19.58	7.49	44.78	35.97	19.24	22.00	4.00	1.74	22.27
27.14	23.35	3.80	54.02	30.51	15.47	22.00	34.00	1.73	16.03
30.49	21.97	8.51	54.07	34.33	11.60	22.00	243.00	2.00	7.60
30.88	22.45	8.43	57.20	36.09	6.71	22.00	14.00	2.08	7.83
36.68	28.26	10.43	65.10	29.54	5.36	22.00	14.00	1.70	13.40
33.92	25.26	8.66	34.68	37.27	28.05	22.00	8.00	2.17	4.37
31.20	20.83	10.37	34.68	37.27	28.05	22.00	8.00	2.01	9.48
33.03	26.95	6.07	48.17	26.72	25.11	22.00	4.00	1.82	17.10
64.14	32.42	31.72	68.34	19.20	12.46	22.00	4.00	1.91	9.71
34.22	28.32	5.91	62.04	15.99	21.97	22.00	4.00	2.20	7.88
31.04	23.87	7.18	47.30	29.39	23.30	22.00	4.00	2.07	7.97
27.63	18.38	9.25	15.02	44.08	40.90	23.00	7.00	1.51	31.03
48.15	30.09	18.07	3.25	68.03	28.72	22.00	7.00	1.47	26.81
64.14	32.42	31.72	23.07	51.31	25.62	22.00	7.00	1.97	7.79
34.22	28.32	5.91	30.78	41.81	27.41	22.00	8.00	1.95	7.96
31.04	23.87	7.18	2.98	10.33	86.69	24.00	10.00	1.98	8.22
33.92	25.26	8.66	19.19	13.94	66.87	24.00	13.00	1.95	8.49
31.20	20.83	10.37	63.10	18.16	18.14	22.00	4.00	1.96	6.61
33.03	26.95	6.07	12.29	18.26	69.45	24.00	10.00	1.97	7.71
30.49	21.97	8.51	2.20	23.07	74.73	24.00	10.00	1.95	7.49
30.88	22.45	8.43	45.32	22.99	31.69	22.00	4.00	1.73	11.77
38.68	28.26	10.43	24.54	27.92	47.54	24.00	8.00	1.86	9.38

34.28	26.31	7.97	0.92	8.77	90.31	24.00	13.00	1.55	10.17
35.18	24.50	10.68	19.61	27.33	53.06	24.00	10.00	1.55	22.51
30.27	21.60	8.67	3.01	15.58	81.41	24.00	10.00	1.49	16.57
26.79	19.37	7.42	36.31	21.29	42.40	24.00	4.00	1.68	12.44
38.05	29.35	8.69	37.45	16.86	45.69	24.00	4.00	1.78	18.20
33.94	20.62	13.32	29.89	29.34	40.77	24.00	4.00	1.61	15.23
41.16	22.21	18.95	5.63	17.00	77.37	24.00	10.00	1.71	10.02
41.08	23.03	18.05	0.31	15.70	83.99	24.00	31.00	1.67	11.95
24.86	19.89	4.97	27.11	24.07	48.82	24.00	4.00	1.70	11.71
46.72	24.67	22.05	30.01	25.88	44.11	24.00	4.00	1.70	1.75
21.61	13.33	8.28	19.31	16.62	64.07	24.00	10.00	1.63	8.86
23.72	12.24	11.47	76.53	19.10	4.36	22.00	1.00	1.52	16.84
33.72	18.12	15.60	38.24	28.53	33.22	22.00	4.00	1.62	12.30
28.91	15.12	13.78	20388.00	27.37	51.76	24.00	10.00	1.50	17.12
26.81	17.44	9.37	21.67	26.37	51.96	24.00	10.00	1.56	16.22
26.70	16.62	10.08	18.86	20.76	60.37	24.00	10.00	1.53	16.09
34.71	14.69	20.02	33.89	22.31	43.80	24.00	4.00	1.51	16.95
36.23	16.56	19.67	57.29	25.94	16.78	20.00	3.00	1.77	8.66
21.05	13.12	7.93	42.67	39.64	17.69	20.00	3.00	1.80	8.55
14.78	9.85	4.93	19.26	22.75	57.99	23.00	9.00	1.82	9.69
48.15	30.09	18.07	11.97	20.88	67.15	24.00	9.00	1.73	11.84
27.63	18.38	9.25	27.47	19.01	53.52	24.00	12.00	1.70	12.17
48.72	24.67	22.05	1.05	24.88	74.07	24.00	10.00	1.74	18.50
21.61	13.33	8.28	0.38	11.40	88.22	24.00	10.00	1.69	17.05
23.72	12.24	11.47	0.16	15.79	84.05	24.00	10.00	2.11	8.40
33.72	18.12	15.60	0.68	17.49	81.83	23.00	10.00	2.19	8.80
28.91	15.12	13.78	8.85	39.71	51.44	24.00	9.00	1.88	10.59
26.81	17.44	9.37	1.68	22.43	75.88	23.00	9.00	1.78	16.55
26.70	16.62	10.08	4.33	28.49	67.17	23.00	9.00	2.03	11.45
34.71	14.69	20.02	20.00	15.10	64.89	24.00	9.00	1.42	33.46
36.23	16.56	19.67	21.49	23.59	54.92	23.00	10.00	1.58	15.16
21.05	13.12	7.93	22.98	15.25	61.77	23.00	10.00	2.15	7.13
21.70	16.57	5.13	1.70	10.21	88.09	23.00	9.00	1.59	22.25
34.28	26.31	7.97	0.11	12.54	87.35	24.00	9.00	1.95	10.98
35.18	24.50	10.68	42.89	33.75	23.36	22.00	4.00	2.04	9.38

30.27	21.60	8.67	42.58	38.57	18.85	22.00	4.00	1.62	19.95
30.49	31.97	8.51	60.02	14.99	24.98	24.00	10.00	2.04	10.10
30.88	22.45	8.43	61.91	22.45	15.64	22.00	6.00	1.74	11.33
38.68	28.26	10.43	40.25	52.11	7.65	20.00	13.00	1.73	13.54
33.92	25.26	8.66	2.70	25.11	72.19	24.00	12.00	1.69	16.99
31.20	20.83	10.37	8.22	31.43	60.35	24.00	12.00	2.05	7.53
33.03	26.95	6.07	2.05	49.02	48.93	24.00	7.00	1.84	13.41
36.98	20.36	16.62	22.26	67.35	10.39	20.00	57.00	1.57	24.19
34.22	28.32	5.91	29.09	9.97	60.95	24.00	10.00	1.69	19.27
31.04	23.87	7.18	35.38	7.79	56.83	24.00	10.00	1.79	17.50
31.24	18.15	13.09	36.89	43.46	19.65	20.00	87.00	1.64	13.10
44.42	18.40	26.02	52.93	37.14	9.93	20.00	23.00	1.77	14.89
33.94	20.62	13.32	40.53	43.99	15.48	20.00	7.00	1.82	13.61
41.16	22.21	18.95	28.30	45.20	26.50	22.00	8.00	1.76	12.48
41.08	23.03	18.05	32.58	41.40	26.02	22.00	8.00	1.80	13.19
26.79	19.37	7.42	23.82	37.44	38.74	24.00	7.00	2.02	12.48
48.03	31.89	16.14	30.78	37.33	31.90	22.00	7.00	1.61	18.40
38.05	29.36	8.69	27.24	20.83	51.93	24.00	10.00	1.75	12.00
34.28	26.31	7.97	15.73	36.37	47.91	23.00	7.00	1.73	14.10
35.18	24.50	10.68	46.31	37.24	16.45	20.00	3.00	1.86	13.57
30.27	21.60	8.67	4.46	69.34	26.34	22.00	7.00	1.60	20.46
30.49	21.97	8.51	25.63	30.21	44.15	23.00	7.00	1.86	13.57
30.88	22.45	8.43	2.74	38.95	58.31	24.00	10.00	1.94	6.35
38.68	28.26	10.43	2.42	26.58	71.00	24.00	9.00	2.15	7.69
33.92	25.26	8.66	20.98	51.95	27.08	22.00	7.00	2.18	6.96
31.20	20.83	10.37	0.00	4.67	95.33	24.00	10.00	2.17	4.93
33.03	26.95	6.07	3.23	42.37	54.41	23.00	9.00	1.82	13.52
36.98	20.36	16.62	56.82	38.95	4.23	20.00	1.00	1.86	13.57
34.22	28.32	5.91	51.29	41.38	7.23	20.00	13.00	1.80	13.50
31.04	23.87	7.18	25.81	54.41	19.78	22.00	87.00	1.85	8.66
31.24	18.15	13.09	51.29	41.38	7.33	20.00	13.00	1.82	9.20
44.42	18.40	26.02	60.30	22.86	16.84	22.00	4.00	1.87	8.49
28.51	20.77	7.74	25.81	54.41	19.78	22.00	87.00	1.88	7.50
48.47	29.25	19.22	16.10	49.04	34.86	22.00	8.00	1.79	9.75
36.65	22.06	14.59	13.04	37.17	49.79	23.00	8.00	1.79	9.16

32.55	19.81	12.74	13.60	45.18	42.22	24.00	8.00	2.00	7.30
30.22	19.13	11.08	13.38	46.04	40.57	23.00	8.00	1.98	9.81
44.24	24.24	20.00	28.78	24.68	46.55	24.00	4.00	1.77	17.21
45.54	22.27	23.27	34.65	38.17	27.18	22.00	8.00	1.67	19.40
46.42	20.76	25.66	9.60	44.04	46.36	24.00	8.00	1.64	18.20
33.78	21.57	12.21	26.11	23.51	50.38	24.00	10.00	1.68	19.16
14.78	9.85	4.93	12.87	25.24	61.89	24.00	10.00	1.65	18.32
24.86	19.89	4.97	47.34	19.54	33.13	22.00	3.00	1.69	18.96
33.94	20.62	13.32	26.94	23.37	49.70	23.00	3.00	1.64	14.56
41.16	22.21	18.95	63.36	20.47	16.17	20.00	3.00	2.17	4.37
41.08	23.03	18.05	71.87	13.97	14.16	20.00	3.00	2.12	2.54
32.05	23.29	8.76	72.22	16.44	11.35	22.00	24.00	2.19	6.43
32.05	23.29	8.76	42.55	33.81	23.64	20.00	67.00	1.44	27.60
26.79	19.37	7.42	24.52	45.78	29.70	22.00	4.00	1.15	28.43
48.03	31.89	16.14	44.78	35.97	19.24	22.00	7.00	1.38	31.56
38.05	29.36	8.69	54.02	30.51	15.47	22.00	4.00	1.48	25.77
34.28	26.31	7.97	54.07	34.33	11.60	22.00	43.00	1.44	23.25
35.18	24.50	10.68	53.22	36.75	10.03	22.00	243.00	1.30	30.34
30.27	21.60	8.67	64.34	31.59	4.06	20.00	1.00	1.28	27.56
30.49	21.97	8.51	34.29	36.91	28.80	22.00	87.00	2.14	6.70
30.88	22.45	8.43	52.05	39.08	8.87	20.00	14.00	2.05	5.37
38.68	28.26	10.43	43.84	36.45	19.71	20.00	43.00	2.08	7.08
33.92	25.26	8.66	45.64	40.94	13.42	22.00	3.00	1.96	4.56
31.20	20.83	10.37	45.10	44.35	10.55	20.00	148.00	2.06	7.19
33.03	26.95	6.07	57.09	27.38	15.54	22.00	4.00	1.96	6.42
36.98	20.36	16.62	47.28	42.46	10.26	20.00	1410.00	2.04	10.50
34.22	28.32	6.91	56.74	27.27	16.00	22.00	4.00	1.90	8.45
31.04	23.87	7.18	46.27	37.49	16.23	22.00	4.00	2.05	6.33
31.24	18.16	13.09	47.86	31.51	20.63	24.00	4.00	1.96	4.62
24.36	18.00	6.35	21.77	31.37	46.87	24.00	8.00	1.91	2.86
48.47	29.25	19.22	42.65	44.82	12.53	20.00	87.00	1.55	28.20
36.65	22.06	14.59	46.02	36.73	17.26	22.00	4.00	1.47	27.52
32.55	19.81	12.74	14.06	47.28	38.66	24.00	8.00	1.36	25.64
30.22	19.13	11.08	5.98	42.17	51.86	24.00	10.00	1.65	25.17
44.24	24.24	20.00	43.39	40.66	15.94	22.00	4.00	1.57	26.53

45.54	22.27	23.27	6.04	18.31	75.65	24.00	12.00	1.54	22.12
46.42	20.76	25.66	42.67	48.36	8.97	20.00	57.00	1.60	27.12
33.78	21.57	12.21	29.74	31.59	38.68	23.00	87.00	1.71	18.14
50.42	22.32	28.09	26.72	41.63	31.66	22.00	8.00	1.58	15.23
40.98	21.66	19.31	27.07	58.02	14.91	22.00	147.00	1.96	9.29
65.14	33.33	31.81	4.71	12.64	82.64	20.00	87.00	1.77	7.34
54.75	32.74	22.01	54.72	35.66	9.62	24.00	10.00	2.05	7.31
41.74	15.92	25.82	52.87	39.51	7.62	22.00	241.00	1.94	6.58
42.67	36.15	6.52	38.85	33.06	28.09	22.00	242.00	1.82	4.23
35.44	19.13	16.30	35.35	33.09	31.56	22.00	43.00	1.97	10.50
35.07	24.39	10.68	13.13	24.16	62.72	24.00	10.00	1.84	9.56
43.87	26.99	16.89	56.76	17.40	25.84	22.00	43.00	1.81	7.46
14.78	9.85	4.93	45.16	48.11	6.73	20.00	67.00	1.68	18.00
43.90	23.20	20.70	44.19	53.64	2.18	20.00	6.00	1.58	14.38
40.90	21.10	19.80	38.45	56.83	4.73	20.00	6.00	1.50	12.43
28.31	17.50	10.58	45.09	54.28	0.64	20.00	2.00	1.57	23.00
33.50	17.34	16.16	14.12	31.72	54.16	23.00	10.00	1.50	21.13
58.33	21.98	36.36	57.19	17.05	25.76	22.00	3.00	1.41	19.43
41.45	18.60	22.85	39.69	28.56	31.75	22.00	4.00	1.80	12.00
45.15	20.31	24.84	55.33	36.20	8.47	22.00	3.00	1.72	10.32
48.95	20.25	28.70	0.09	25.10	74.82	24.00	9.00	1.68	8.51
43.73	18.63	25.09	44.21	40.95	14.83	22.00	143.00	1.91	9.60
43.20	17.24	25.96	27.52	52.83	19.65	20.00	87.00	1.82	7.56
57.67	21.08	36.59	49.90	38.89	11.21	22.00	8.00	1.77	5.46
48.12	19.86	28.26	60.42	30.99	8.60	22.00	243.00	1.65	17.39
34.79	18.18	16.60	40.33	34.26	25.41	22.00	43.00	1.58	16.00
37.20	15.93	21.27	52.95	32.57	14.48	20.00	43.00	1.49	12.32
39.93	22.14	17.78	65.90	29.73	4.38	22.00	1.00	1.62	19.50
33.68	19.67	14.00	38.94	11.75	49.32	24.00	4.00	1.57	16.23
45.65	21.31	24.35	40.63	55.46	3.91	20.00	6.00	1.49	15.12
33.51	17.53	15.99	40.81	46.08	13.11	20.00	7.00	1.95	12.16
19.66	13.06	6.60	14.76	40.10	45.14	23.00	7.00	1.83	10.37
37.69	21.31	16.39	22.20	61.47	16.33	22.00	8.00	1.80	7.00
34.21	21.56	12.65	27.22	54.27	18.51	22.00	87.00	1.95	11.19
31.82	17.08	14.74	25.61	58.37	16.02	22.00	8.00	1.57	13.30

43.90	23.20	20.70	68.49	27.01	4.50	22.00	1.00	1.32	9.56
14.78	9.85	4.93	22.85	37.12	40.03	23.00	7.00	1.92	12.58
31.24	15.15	13.09	59.16	34.58	6.25	22.00	41.00	1.79	10.62
27.28	16.93	10.35	9.60	44.04	46.36	24.00	8.00	1.89	13.54
30.81	19.92	10.89	26.11	23.51	50.38	24.00	10.00	1.79	9.43
30.33	21.64	8.69	24.39	40.54	35.06	23.00	8.00	1.59	12.52
32.87	25.15	7.72	25.63	30.21	44.15	23.00	7.00	1.79	13.89
46.83	32.79	14.04	2.32	34.00	63.69	23.00	109.00	1.53	12.26
31.97	22.79	9.18	56.61	9.50	33.89	22.00	3.00	1.52	12.25
33.29	23.14	10.15	0.00	19.38	80.62	24.00	9.00	1.86	10.97
30.78	21.46	9.33	69.49	15.27	15.24	22.00	3.00	1.71	9.64
31.47	22.34	9.12	57.69	23.25	19.06	22.00	4.00	1.93	10.70
32.69	22.32	10.37	36.18	44.95	18.88	22.00	7.00	1.77	10.62
27.70	17.65	10.04	18.10	44.85	37.05	24.00	7.00	1.86	11.73
32.05	22.91	9.31	42.41	33.11	24.49	22.00	4.00	1.78	10.12
30.35	20.73	9.62	60.02	14.99	24.98	22.00	3.00	1.97	11.05
29.96	18.88	11.08	51.29	41.38	7.33	20.00	31.00	1.79	8.59
33.19	22.61	10.59	51.29	41.38	7.33	20.00	31.00	1.58	13.81
34.35	23.84	10.51	51.29	41.38	7.33	20.00	31.00	1.51	12.38
32.90	23.39	9.51	61.91	22.46	15.64	20.00	3.00	1.60	12.53
32.80	23.32	9.48	43.94	44.67	11.39	22.00	68.00	1.57	12.74
31.59	22.03	9.56	49.53	35.70	14.77	22.00	4.00	1.29	11.49
30.72	19.20	11.52	60.21	34.06	5.72	20.00	31.00	1.59	12.83
25.80	18.14	7.66	35.77	42.77	21.46	22.00	7.00	1.46	11.52
26.17	18.86	7.32	42.28	41.97	15.75	20.00	3.00	2.17	4.37
35.21	23.16	12.04	40.61	50.34	9.05	20.00	31.00	2.08	3.56
34.79	23.70	11.09	23.36	60.32	16.32	20.00	7.00	2.17	4.37
35.21	23.16	12.04	39.00	53.40	7.59	20.00	31.00	2.08	3.58
34.79	23.70	11.09	39.08	52.86	8.06	20.00	75.00	2.05	6.33
32.28	23.08	9.10	24.04	50.02	25.95	22.00	8.00	1.92	2.47
33.19	24.92	8.26	45.10	44.35	10.35	20.00	41.00	1.70	22.45
34.90	26.20	8.70	47.28	42.46	10.26	20.00	41.00	1.63	20.41
36.87	19.31	17.56	42.65	44.82	12.53	20.00	78.00	1.58	19.34
29.22	16.71	12.51	46.02	36.73	17.26	22.00	4.00	1.53	13.70
29.25	19.97	9.28	65.29	17.76	16.96	22.00	4.00	1.46	12.12

30.77	22.57	8.19	5.98	42.17	51.85	24.00	10.00	1.60	16.02
31.99	17.83	14.16	6.04	18.31	75.65	24.00	12.00	1.46	14.23
27.50	18.45	9.05	42.67	48.36	8.97	20.00	53.00	1.42	11.26
29.50	17.38	12.12	29.74	31.59	38.68	23.00	87.00	1.64	18.30
24.60	15.42	9.18	26.72	41.63	31.65	22.00	8.00	1.65	10.30
45.26	19.19	26.07	41.51	44.74	13.75	20.00	7.00	1.53	9.34
46.60	28.20	18.30	30.71	30.48	38.81	23.00	4.00	1.70	9.80
26.56	20.29	6.27	61.37	27.68	10.95	20.00	32.00	1.59	7.47
27.56	18.90	8.66	58.24	30.40	11.36	20.00	32.00	1.43	19.90
24.77	17.49	7.27	21.11	28.02	50.88	24.00	10.00	1.35	16.62
19.44	15.23	4.21	13.21	67.99	18.80	20.00	7.00	1.32	9.37
25.92	15.68	10.24	8.71	40.83	50.46	23.00	9.00	1.65	13.57
30.27	17.89	12.38	1.29	43.51	55.21	24.00	12.00	1.60	12.28
25.91	16.16	9.75	5.75	46.38	47.87	23.00	7.00	1.55	12.03
29.74	31.63	8.11	40.26	54.60	5.14	20.00	67.00	1.86	10.51
19.05	15.26	3.79	10.54	24.46	65.00	22.00	23.00	1.75	9.46
29.78	21.53	8.25	66.01	25.21	8.78	22.00	41.00	1.73	9.04
23.58	14.84	8.74	40.25	52.11	7.65	20.00	243.00	1.91	9.60
27.56	16.57	10.99	54.02	30.51	15.47	20.00	67.00	1.83	9.62
29.56	17.98	11.58	54.07	34.33	11.60	22.00	234.00	1.68	17.20
19.60	15.50	4.10	53.22	36.75	10.03	20.00	234.00	1.58	16.30
28.66	21.68	6.98	34.29	36.91	28.80	22.00	78.00	1.54	15.03
24.38	19.74	4.64	53.22	36.75	10.03	20.00	234.00	1.48	16.22
42.80	..32	9.48	52.05	39.08	8.87	20.00	41.00	1.34	14.16
24.48	16.71	7.78	62.89	22.64	14.48	22.00	43.00	2.16	6.12
35.92	27.47	8.45	1.05	24.88	74.07	24.00	10.00	2.15	4.26
26.00	17.80	8.20	1.68	22.43	75.88	23.00	9.00	2.12	3.46
25.82	19.33	6.49	9.94	44.61	45.44	24.00	7.00	1.64	21.28
26.09	19.81	6.27	39.00	53.40	7.59	20.00	57.00	1.51	20.31
43.03	30.99	12.04	24.04	50.02	25.95	22.00	8.00	1.46	19.08
24.64	16.92	7.72	4.33	28.49	67.17	23.00	9.00	1.79	18.60
42.39	24.81	17.58	50.62	20.24	29.14	22.00	3.00	1.64	17.26
49.12	30.59	18.53	76.82	18.52	4.66	22.00	1.00	1.57	15.35
30.97	25.38	5.59	2.19	10.31	87.50	24.00	12.00	1.73	9.73
28.60	23.12	5.47	20.25	47.78	31.97	22.00	7.00	1.65	8.40

26.68	22.57	4.11	23.21	40.17	36.62	23.00	7.00	1.56	7.13
29.45	18.93	10.52	58.74	29.69	11.57	20.00	23.00	1.99	8.87
36.76	23.09	13.67	68.32	26.18	5.50	20.00	41.00	1.90	7.00
33.04	20.25	12.80	44.44	36.36	19.21	20.00	3.00	1.85	6.53
20.90	16.13	4.77	0.00	22.83	77.17	24.00	10.00	1.78	5.40
38.22	22.24	15.98	24.89	41.32	33.79	23.00	8.00	1.76	12.07
37.57	23.23	14.34	52.03	32.60	15.37	23.00	4.00	1.67	11.21
35.53	23.64	11.89	26.46	57.31	16.22	20.00	7.00	1.64	8.00
33.28	23.44	9.83	25.54	58.35	16.11	20.00	8.00	1.70	13.64
33.07	23.08	9.99	50.00	43.11	6.89	20.00	134.00	1.66	12.30
24.44	17.99	6.45	36.30	39.93	23.77	23.00	87.00	1.85	8.63
23.26	17.15	6.11	45.21	33.72	21.02	23.00	4.00	1.75	7.52
42.12	32.18	9.94	0.24	9.62	90.14	24.00	9.00	1.71	4.00
42.63	33.97	8.66	8.00	33.30	58.70	23.00	109.00	2.05	6.33
37.48	25.07	12.41	13.72	18.64	67.64	23.00	9.00	1.96	5.03
39.99	22.83	17.15	24.83	38.03	37.13	23.00	8.00	1.92	3.42
38.92	22.82	16.10	20.89	73.48	5.64	22.00	68.00	2.12	6.46
25.15	19.86	5.29	9.44	46.73	43.83	23.00	8.00	1.96	5.38
26.55	20.85	5.69	23.28	38.70	38.02	23.00	8.00	1.92	3.00
36.63	24.22	12.41	65.42	24.73	9.85	22.00	34.00	1.98	10.58
30.61	24.97	5.64	22.88	38.56	38.57	24.00	8.00	1.88	9.12
31.95	22.29	9.66	9.44	46.73	43.83	20.00	8.00	1.79	5.00
30.61	26.98	3.63	1.63	20.56	77.81	24.00	10.00	1.97	12.00
32.39	23.13	9.26	49.18	26.28	24.54	22.00	4.00	2.03	10.72
26.22	20.01	6.21	55.39	14.19	30.42	22.00	4.00	1.75	9.23
26.97	17.00	9.98	41.72	38.60	19.68	22.00	3.00	1.71	6.03
44.88	33.11	11.77	30.67	38.07	31.26	22.00	8.00	1.72	13.93
43.44	32.91	10.52	27.24	20.83	51.93	24.00	10.00	1.68	13.12
41.85	28.29	13.56	44.21	40.95	14.83	20.00	4.00	1.64	10.05
29.55	20.56	8.99	45.21	40.62	14.17	23.00	4.00	1.94	7.66
41.44	21.25	20.19	27.52	52.83	19.65	20.00	87.00	1.79	6.27
41.08	25.67	15.41	43.78	43.26	12.96	23.00	43.00	1.76	4.13
27.60	19.56	8.04	57.29	25.94	16.78	22.00	6.00	1.98	10.21
29.18	25.52	3.66	42.67	39.64	17.69	24.00	10.00	1.95	9.36
27.33	19.20	8.13	57.29	25.94	16.78	20.00	3.00	1.93	6.15

32.79	22.86	9.94	33.89	22.31	43.80	24.00	4.00	1.99	10.24
31.03	24.10	6.93	19.31	16.62	64.07	24.00	10.00	1.90	6.03
21.02	14.49	6.52	76.53	19.10	4.36	23.00	1.00	1.61	14.99
24.89	18.65	6.24	38.24	28.53	33.22	22.00	4.00	1.33	13.03
24.14	18.04	6.10	37.45	16.86	45.69	24.00	4.00	1.28	7.54
26.36	19.48	6.88	29.89	29.34	40.77	24.00	4.00	1.56	14.74
41.32	30.82	10.50	0.31	15.70	83.99	24.00	13.00	1.42	12.31
26.57	19.35	7.22	45.32	22.99	31.69	22.00	4.00	1.36	8.03
46.14	29.51	16.63	24.54	27.92	47.54	24.00	8.00	2.05	6.33
47.38	24.83	22.95	0.92	8.77	90.31	24.00	13.00	1.98	4.38
20.89	15.23	5.66	19.61	27.33	53.06	24.00	10.00	1.92	1.13
20.08	15.08	5.00	47.30	29.39	23.30	22.00	4.00	2.17	4.37
38.22	25.52	12.70	38.50	38.35	23.15	22.00	4.00	2.11	3.48
37.67	25.18	12.49	45.28	40.28	14.44	22.00	4.00	2.09	2.15
23.20	16.36	6.36	22.43	49.75	27.82	22.00	8.00	1.60	15.00
22.98	16.77	6.21	22.99	52.23	24.78	22.00	41.00	1.40	13.00
21.68	15.44	6.25	10.54	24.46	65.00	23.00	10.00	1.35	10.24
19.59	14.65	4.94	0.44	7.86	91.71	23.00	9.00	1.64	21.28
19.10	15.18	3.93	0.00	13.51	86.49	23.00	9.00	1.53	20.40
18.75	14.67	4.08	3.59	30.59	65.83	23.00	9.00	1.47	18.00
17.23	13.25	3.98	46.00	38.23	15.77	20.00	3.00	1.43	16.00
23.20	15.38	7.81	53.60	34.40	12.00	20.00	41.00	1.65	20.09
22.98	15.94	7.04	62.72	29.43	7.85	20.00	4.00	1.55	19.23
23.40	13.84	9.56	57.56	36.95	5.49	20.00	4.00	1.53	15.00
27.36	16.72	10.64	47.00	31.92	21.08	22.00	3.00	1.85	12.82
24.38	16.44	7.94	59.84	28.83	11.33	20.00	32.00	1.75	10.49
24.69	16.67	8.02	54.26	29.47	16.27	20.00	3.00	1.77	15.72
31.54	21.06	10.48	73.10	20.18	6.72	20.00	32.00	1.65	13.42
32.37	20.98	11.39	4.71	12.64	82.64	24.00	10.00	1.63	14.81
20.18	14.11	6.07	2.12	23.75	74.13	24.00	10.00	1.35	12.67
19.04	13.80	5.24	54.72	35.66	9.62	22.00	32.00	1.25	9.73
20.25	13.77	6.47	52.87	39.51	7.62	22.00	3.00	1.72	13.60
20.63	13.82	6.82	13.13	24.16	62.72	24.00	10.00	1.67	11.57
18.73	13.38	5.36	45.16	48.11	6.73	20.00	67.00	1.61	9.03
19.29	13.45	5.84	38.45	53.83	4.73	20.00	6.00	1.65	17.59

20.18	14.11	6.07	57.19	17.05	25.76	22.00	3.00	1.55	16.04
19.04	13.80	5.24	28.65	42.83	28.53	22.00	8.00	1.50	12.12
26.63	17.60	9.03	39.69	28.56	31.75	22.00	4.00	1.68	18.10
25.77	17.43	8.34	0.16	15.79	84.05	24.00	10.00	1.58	16.35
20.05	13.62	6.43	1.05	24.88	74.07	24.00	10.00	1.52	12.16
20.94	14.41	6.53	0.68	17.49	81.83	23.00	10.00	2.01	5.53
25.89	18.10	7.79	9.94	44.61	45.44	23.00	7.00	1.90	3.47
26.57	19.35	7.22	1.68	22.43	75.88	23.00	9.00	1.88	2.06
26.82	18.41	8.41	4.33	28.49	67.17	23.00	8.00	1.91	11.17
27.36	19.46	7.91	50.62	20.24	29.14	22.00	3.00	1.80	8.00
19.94	15.30	4.65	7682.00	18.52	4.66	22.00	1.00	1.77	6.48
18.95	13.79	5.15	79.10	14.44	6.45	22.00	24.00	1.43	19.90
24.31	16.53	7.78	59.66	9.21	31.13	22.00	3.00	1.39	17.32
24.29	16.76	7.53	0.68	17.49	81.83	22.00	10.00	1.35	15.23
19.77	13.62	6.15	9.94	44.61	45.44	23.00	7.00	1.72	9.06
21.95	15.08	6.87	1.68	22.43	75.88	23.00	9.00	1.64	8.12
37.60	26.41	11.19	1.05	24.88	74.07	23.00	10.00	1.59	7.03
38.18	26.43	11.75	0.38	11.40	88.22	24.00	10.00	1.55	6.00
30.15	23.08	7.07	1.63	20.56	77.81	24.00	9.00	1.71	11.20
29.16	20.32	8.84	49.18	26.28	24.54	22.00	4.00	1.65	10.24
29.26	19.28	9.98	20.30	41.89	37.81	24.00	8.00	1.62	8.12
20.15	17.23	2.92	43.87	22.09	34.05	22.00	4.00	1.67	10.24
28.47	19.44	9.03	55.39	14.19	30.42	22.00	4.00	1.58	7.64
23.57	18.30	5.27	8.29	16.16	75.54	24.00	10.00	1.55	5.12
33.79	22.69	11.11	9.59	34.29	56.13	23.00	10.00	1.70	10.88
32.71	21.23	11.48	2.56	22.31	75.12	24.00	13.00	1.63	9.32
36.62	24.32	12.30	3.81	22.53	73.66	24.00	10.00	1.54	8.23
36.08	23.14	12.95	18.91	35.22	45.87	23.00	8.00	1.52	6.03
49.13	29.60	19.60	27.15	26.82	46.03	23.00	4.00	1.76	9.42
32.03	21.79	10.24	7.92	26.12	65.96	23.00	10.00	1.68	8.67
49.67	28.14	21.53	27.94	25.11	46.95	24.00	4.00	1.65	18.72
42.27	25.03	17.25	47.14	47.34	5.52	20.00	81.00	1.57	17.12
45.03	25.08	19.95	16.68	16.51	66.81	24.00	12.00	1.48	13.42
30.61	20.41	10.20	15.31	14.54	70.14	24.00	9.00	1.43	9.12
42.63	29.07	13.56	22.36	18.22	59.42	24.00	12.00	1.62	16.85

35.61	23.23	12.38	23.56	21.55	54.89	24.00	10.00	1.74	1107.00
31.96	21.35	10.60	49.21	28.34	22.45	22.00	3.00	1.69	10.00
53.62	26.54	27.09	46.44	26.90	26.67	22.00	3.00	1.68	7.32
44.08	21.70	22.37	43.66	24.33	32.02	22.00	3.00	1.73	10.33
52.08	28.60	23.48	38.66	31.66	29.69	22.00	4.00	1.67	12.81
36.24	23.42	12.82	38.03	29.19	32.77	22.00	3.00	1.69	12.09
40.96	25.82	15.14	42.35	22.10	35.55	24.00	4.00	1.86	13.57
25.46	17.88	7.58	66.33	18.26	15.40	22.00	3.00	1.80	12.45
29.51	21.29	8.21	40.77	24.58	34.65	22.00	4.00	1.75	8.03
29.37	21.44	7.92	42.41	33.11	24.49	22.00	4.00	2.05	6.33
33.84	23.50	10.34	5.21	19.81	74.97	24.00	9.00	1.91	1.23
44.04	31.16	12.88	54.03	28.19	17.78	22.00	43.00	2.17	4.37
41.32	30.82	10.50	29.46	32.16	38.38	24.00	7.00	2.05	6.33
26.57	19.35	7.22	41.46	32.70	25.84	22.00	43.00	1.97	5.31
14.78	9.85	4.93	72.15	21.03	6.82	20.00	41.00	1.95	7.32
14.78	9.85	4.93	22.00	6.44	71.55	24.00	9.00	1.88	5.38
42.67	36.15	6.52	39.75	8.96	51.29	23.00	109.00	1.95	7.32
35.44	19.13	16.30	20.65	44.29	35.06	24.00	8.00	1.88	5.68
35.07	24.39	10.68	34.13	44.01	21.86	20.00	87.00	2.02	8.21
35.69	23.54	12.15	63.75	30.02	6.23	20.00	23.00	1.48	20.48
39.83	25.46	14.37	50.26	37.50	12.24	20.00	4.00	1.34	22.27
39.04	27.49	11.56	50.24	37.52	12.24	20.00	4.00	1.53	27.83
40.00	25.62	14.39	0.00	41.82	58.18	23.00	9.00	1.41	16.15
47.36	29.96	17.40	21.99	19.20	58.81	23.00	10.00	1.51	20.44
37.15	28.86	8.29	24.98	59.92	15.09	20.00	8.00	1.39	18.45
41.05	25.67	15.38	53.23	39.12	7.65	22.00	41.00	1.53	20.82
42.06	30.59	11.47	62.48	30.90	6.61	22.00	24.00	1.34	27.98
41.49	25.51	15.98	46.42	37.83	15.74	22.00	4.00	1.52	21.46
35.79	26.12	9.67	34.25	48.10	17.65	20.00	8.00	1.50	21.33
35.34	22.85	12.50	32.41	46.08	21.51	22.00	9.00	1.86	13.57
35.29	27.26	8.03	38.96	34.08	26.97	22.00	4.00	1.86	13.57
22.46	16.81	5.65	43.09	36.20	20.71	22.00	4.00	1.81	13.00
28.58	21.11	7.47	74.20	18.92	6.58	22.00	23.00	1.53	20.82
23.21	17.88	5.33	79.33	15.45	5.22	22.00	23.00	1.87	13.57
23.21	19.06	4.16	76.07	20.61	3.32	22.00	1.00	1.85	6.54

31.34	24.62	6.72	73.99	21.78	4.23	22.00	1.00	1.75	4.56
47.37	32.29	15.08	76.20	15.84	7.96	20.00	23.00	1.65	2.31
27.58	20.72	6.86	50.83	15.64	33.53	22.00	3.00	1.60	20.46
23.32	17.34	5.97	0.00	4.67	95.33	24.00	10.00	1.50	18.12
36.28	24.93	11.35	3.23	42.37	54.41	23.00	9.00	1.47	13.58
38.28	27.65	10.63	45.96	20.83	33.22	22.00	4.00	1.81	12.15
27.60	19.56	8.04	4.33	28.09	67.57	24.00	10.00	1.75	10.52
24.99	18.20	6.79	2.79	14.87	82.34	24.00	9.00	1.55	22.53
32.51	25.76	6.75	15.73	36.37	47.91	23.00	7.00	1.44	21.12
21.56	15.85	5.71	12.87	25.24	61.89	24.00	10.00	1.35	17.25
40.52	25.89	14.64	47.34	19.54	33.13	22.00	3.00	1.68	12.44
29.18	20.54	8.64	26.94	23.37	49.70	23.00	3.00	1.61	15.23
39.67	24.47	15.20	63.36	20.47	16.17	20.00	3.00	1.50	14.00
27.94	19.44	8.51	0.00	34.43	65.57	23.00	9.00	1.46	12.35
26.36	19.48	6.88	5.09	40.23	54.67	24.00	13.00	1.63	11.38
44.04	31.16	12.88	0.00	32.81	67.19	24.00	9.00	1.46	10.01
41.32	30.82	10.50	29.14	38.12	32.74	22.00	8.00	1.40	8.45
22.13	13.99	8.15	16.08	47.45	36.47	23.00	8.00	1.70	12.18
25.79	13.96	11.84	70.70	8.69	20.61	22.00	4.00	1.63	11.10
27.62	18.53	9.10	55.92	10.83	33.25	22.00	4.00	1.60	9.00
20.21	13.49	6.71	8.10	12.79	79.10	24.00	10.00	1.51	16.96
28.29	18.48	9.82	36.14	44.91	18.95	22.00	8.00	1.40	15.00
19.93	14.97	4.96	31.88	54.34	13.79	22.00	8.00	1.82	16.44
20.75	15.00	5.75	14.59	12.14	73.27	24.00	9.00	1.71	19.25
20.53	14.81	5.72	45.29	17.33	37.38	24.00	3.00	1.78	17.76
18.74	14.98	3.76	2.25	13.49	84.26	24.00	9.00	1.71	19.25
19.15	14.98	4.17	0.24	18.23	81.54	23.00	10.00	1.78	17.76
19.92	14.91	5.01	43.95	15.69	40.36	23.00	3.00	1.64	23.10
22.13	13.99	8.15	35.22	46.61	18.17	22.00	8.00	1.93	10.75
25.79	13.96	11.84	34.12	50.24	15.64	22.00	8.00	1.77	9.12
29.35	18.89	10.46	64.14	23.42	12.44	22.00	4.00	1.70	6.57
27.62	18.53	9.10	51.29	41.38	7.33	20.00	31.00	1.85	11.86
29.39	17.02	12.38	55.33	36.20	8.47	20.00	41.00	1.99	8.84
20.21	13.49	6.71	90.72	5.32	3.95	22.00	1.00	2.19	8.80
32.49	18.91	13.57	85.57	11.23	3.19	22.00	1.00	1.98	8.72

28.29	18.48	9.82	0.09	25.10	74.82	24.00	9.00	2.17	4.32
20.75	15.00	5.75	16.39	19.72	63.89	24.00	10.00	1.75	11.16
14.78	9.85	4.93	87.28	7.31	5.42	22.00	143.00	2.19	8.80
14.78	9.85	4.93	81.82	1.04	5.14	22.00	43.00	1.85	7.30
21.70	16.57	5.13	0.49	36.13	63.38	24.00	13.00	1.98	9.60
33.67	25.85	7.82	3.63	34.05	62.32	24.00	9.00	1.43	29.00
31.34	24.36	6.98	0.00	48.31	51.69	23.00	12.00	1.91	5.00
29.19	23.40	5.79	37.48	36.45	26.07	22.00	3.00	2.32	5.60
52.27	43.59	8.67	27.05	46.48	26.46	23.00	7.00	2.13	10.20
51.62	41.76	9.87	1.63	20.56	77.81	24.00	10.00	2.45	804.00
34.28	27.80	6.48	49.18	26.28	24.54	22.00	4.00	2.22	6.90
36.17	29.79	6.38	43.87	22.09	34.05	22.00	4.00	2.06	7.60

Fuente: Elaboración Propia utilizando el programa Win Edit

Tabla N°11: Parámetros o datos normalizados ingresados a la red neuronal artificial

Límite líquido	Límite plástico	Indice plasticidad	% Grava	% Arena	% fina	AASTHO_N	SUCS_N	Máx. Dens. Seca	Humedad Óptima
0.517	0.488	0.537	0.499	0.494	0.561	0.456	0.495	0.446	0.503
0.588	0.511	0.621	0.498	0.620	0.493	0.706	0.493	0.519	0.497
0.588	0.523	0.607	0.498	0.538	0.572	0.456	0.495	0.420	0.500
0.446	0.469	0.449	0.498	0.593	0.532	0.706	0.495	0.386	0.501
0.557	0.617	0.468	0.498	0.599	0.523	0.456	0.495	0.644	0.496
0.520	0.572	0.458	0.499	0.451	0.555	0.706	0.493	0.500	0.501
0.529	0.545	0.498	0.499	0.544	0.453	0.456	0.495	0.481	0.500
0.480	0.502	0.468	0.499	0.603	0.375	0.456	0.495	0.653	0.496
0.448	0.472	0.450	0.499	0.529	0.339	0.456	0.492	0.612	0.496
0.449	0.528	0.396	0.499	0.643	0.360	0.206	0.494	0.612	0.496
0.482	0.508	0.466	0.498	0.482	0.682	0.706	0.495	0.614	0.496
0.486	0.515	0.464	0.498	0.504	0.663	0.706	0.496	0.426	0.502
0.564	0.601	0.494	0.498	0.437	0.717	0.581	0.496	0.343	0.511
0.516	0.557	0.468	0.498	0.524	0.649	0.581	0.495	0.664	0.494
0.489	0.491	0.493	0.498	0.486	0.678	0.581	0.496	0.604	0.496
0.508	0.582	0.429	0.498	0.580	0.603	0.706	0.496	0.668	0.495
0.817	0.663	0.810	0.499	0.489	0.344	0.456	0.493	0.558	0.497
0.519	0.602	0.427	0.498	0.578	0.508	0.706	0.495	0.594	0.497
0.488	0.536	0.446	0.499	0.543	0.343	0.456	0.493	0.560	0.496
0.458	0.470	0.469	0.499	0.520	0.343	0.456	0.492	0.558	0.497
0.477	0.505	0.461	0.499	0.488	0.328	0.456	0.492	0.594	0.497
0.372	0.388	0.421	0.498	0.494	0.613	0.581	0.496	0.560	0.496
0.440	0.462	0.448	0.499	0.454	0.391	0.456	0.493	0.637	0.496
0.485	0.467	0.512	0.499	0.404	0.484	0.456	0.493	0.446	0.503
0.446	0.451	0.453	0.498	0.330	0.798	0.706	0.496	0.519	0.497
0.543	0.616	0.448	0.499	0.408	0.410	0.456	0.493	0.420	0.500
0.548	0.606	0.466	0.498	0.380	0.745	0.706	0.495	0.386	0.501
0.434	0.478	0.423	0.498	0.626	0.489	0.456	0.495	0.596	0.496
0.416	0.418	0.457	0.499	0.459	0.394	0.456	0.493	0.410	0.501
0.459	0.470	0.469	0.499	0.611	0.436	0.456	0.495	0.418	0.504
0.477	0.505	0.461	0.499	0.611	0.405	0.456	0.495	0.386	0.501
0.416	0.418	0.457	0.498	0.656	0.409	0.456	0.495	0.420	0.500

0.412	0.414	0.455	0.498	0.726	0.465	0.456	0.495	0.519	0.497
0.603	0.527	0.627	0.498	0.723	0.363	0.206	0.494	0.446	0.503
0.495	0.524	0.469	0.499	0.538	0.398	0.456	0.493	0.637	0.496
0.593	0.480	0.660	0.498	0.587	0.494	0.706	0.495	0.460	0.501
0.699	0.592	0.705	0.498	0.568	0.593	0.706	0.496	0.465	0.502
0.681	0.609	0.661	0.498	0.400	0.744	0.706	0.497	0.462	0.502
0.596	0.505	0.639	0.498	0.524	0.649	0.581	0.496	0.664	0.494
0.609	0.588	0.574	0.498	0.400	0.744	0.706	0.497	0.418	0.504
0.571	0.666	0.439	0.498	0.524	0.649	0.581	0.496	0.410	0.501
0.576	0.560	0.553	0.498	0.486	0.678	0.581	0.495	0.596	0.496
0.612	0.615	0.552	0.498	0.580	0.603	0.581	0.496	0.460	0.501
0.569	0.597	0.506	0.499	0.483	0.372	0.456	0.493	0.465	0.502
0.581	0.539	0.582	0.499	0.491	0.365	0.456	0.493	0.462	0.502
0.326	0.328	0.412	0.500	0.454	0.340	0.206	0.492	0.621	0.495
0.433	0.471	0.428	0.499	0.475	0.352	0.456	0.493	0.420	0.500
0.429	0.469	0.424	0.499	0.587	0.363	0.456	0.493	0.386	0.501
0.391	0.436	0.401	0.499	0.561	0.361	0.456	0.493	0.388	0.508
0.502	0.575	0.427	0.499	0.706	0.369	0.456	0.494	0.388	0.508
0.439	0.474	0.434	0.498	0.762	0.429	0.456	0.495	0.446	0.503
0.416	0.453	0.421	0.498	0.752	0.406	0.456	0.495	0.420	0.500
0.404	0.441	0.416	0.498	0.704	0.395	0.456	0.495	0.386	0.501
0.433	0.463	0.436	0.499	0.517	0.415	0.456	0.493	0.624	0.496
0.391	0.436	0.401	0.499	0.535	0.425	0.456	0.493	0.579	0.495
0.412	0.457	0.411	0.498	0.310	0.813	0.706	0.496	0.382	0.501
0.419	0.463	0.416	0.498	0.394	0.733	0.706	0.496	0.664	0.494
0.433	0.493	0.408	0.498	0.346	0.784	0.706	0.495	0.637	0.496
0.394	0.436	0.405	0.498	0.367	0.768	0.706	0.496	0.446	0.503
0.326	0.328	0.412	0.498	0.465	0.560	0.706	0.495	0.431	0.501
0.391	0.436	0.401	0.498	0.469	0.664	0.706	0.496	0.505	0.498
0.502	0.575	0.442	0.499	0.487	0.382	0.456	0.493	0.547	0.496
0.439	0.474	0.434	0.499	0.489	0.419	0.456	0.493	0.420	0.500
0.416	0.453	0.421	0.499	0.507	0.414	0.456	0.493	0.386	0.501
0.404	0.441	0.416	0.498	0.306	0.814	0.706	0.503	0.632	0.496
0.433	0.463	0.436	0.498	0.334	0.794	0.706	0.496	0.579	0.495
0.391	0.436	0.401	0.498	0.314	0.807	0.706	0.497	0.382	0.501

0.412	0.457	0.411	0.498	0.400	0.744	0.706	0.496	0.602	0.497
0.419	0.463	0.416	0.498	0.368	0.769	0.706	0.495	0.330	0.506
0.433	0.493	0.408	0.498	0.442	0.665	0.581	0.496	0.401	0.504
0.394	0.436	0.405	0.499	0.423	0.459	0.456	0.493	0.386	0.505
0.427	0.477	0.413	0.499	0.498	0.463	0.456	0.493	0.664	0.494
0.517	0.488	0.537	0.498	0.432	0.719	0.706	0.496	0.484	0.499
0.588	0.511	0.621	0.498	0.418	0.704	0.706	0.495	0.602	0.497
0.588	0.523	0.607	0.499	0.362	0.569	0.706	0.493	0.539	0.500
0.446	0.469	0.449	0.499	0.455	0.356	0.206	0.493	0.489	0.503
0.557	0.617	0.468	0.499	0.567	0.349	0.206	0.492	0.480	0.502
0.520	0.572	0.458	0.499	0.641	0.351	0.206	0.494	0.497	0.500
0.529	0.545	0.498	0.499	0.514	0.434	0.456	0.493	0.510	0.502
0.480	0.502	0.468	0.498	0.597	0.466	0.456	0.495	0.562	0.498
0.448	0.472	0.450	0.499	0.529	0.411	0.456	0.493	0.501	0.503
0.449	0.528	0.396	0.499	0.492	0.392	0.456	0.504	0.495	0.500
0.482	0.508	0.466	0.499	0.518	0.371	0.456	0.578	0.601	0.496
0.486	0.515	0.464	0.499	0.530	0.346	0.456	0.497	0.629	0.496
0.544	0.601	0.494	0.499	0.485	0.339	0.456	0.497	0.483	0.499
0.516	0.557	0.468	0.499	0.538	0.458	0.456	0.495	0.664	0.494
0.489	0.491	0.493	0.499	0.538	0.458	0.456	0.495	0.604	0.497
0.508	0.582	0.429	0.499	0.465	0.442	0.456	0.493	0.532	0.500
0.817	0.663	0.810	0.500	0.414	0.376	0.456	0.493	0.565	0.497
0.519	0.602	0.427	0.499	0.391	0.426	0.456	0.493	0.678	0.496
0.488	0.536	0.446	0.499	0.484	0.433	0.456	0.493	0.625	0.496
0.454	0.455	0.477	0.498	0.585	0.525	0.581	0.495	0.411	0.507
0.658	0.628	0.608	0.498	0.751	0.461	0.456	0.495	0.395	0.505
0.817	0.663	0.810	0.498	0.635	0.445	0.456	0.495	0.587	0.496
0.519	0.602	0.427	0.499	0.570	0.454	0.456	0.495	0.580	0.496
0.488	0.536	0.446	0.498	0.352	0.765	0.706	0.496	0.591	0.496
0.516	0.557	0.468	0.498	0.377	0.661	0.706	0.497	0.580	0.496
0.489	0.491	0.493	0.499	0.406	0.406	0.456	0.493	0.584	0.495
0.508	0.582	0.429	0.498	0.407	0.675	0.706	0.496	0.590	0.496
0.482	0.508	0.466	0.498	0.440	0.702	0.706	0.496	0.581	0.496
0.486	0.515	0.464	0.499	0.440	0.477	0.456	0.493	0.495	0.498
0.564	0.601	0.494	0.498	0.474	0.560	0.706	0.495	0.544	0.497

0.520	0.572	0.458	0.498	0.342	0.784	0.706	0.497	0.427	0.497
0.529	0.545	0.498	0.498	0.470	0.589	0.706	0.496	0.426	0.503
0.480	0.502	0.468	0.498	0.389	0.737	0.706	0.496	0.405	0.500
0.446	0.469	0.449	0.499	0.428	0.533	0.706	0.493	0.479	0.498
0.557	0.617	0.468	0.499	0.397	0.550	0.706	0.493	0.515	0.501
0.517	0.488	0.537	0.499	0.483	0.524	0.706	0.493	0.450	0.499
0.588	0.511	0.621	0.498	0.398	0.716	0.706	0.496	0.488	0.497
0.588	0.523	0.607	0.498	0.389	0.751	0.706	0.503	0.473	0.498
0.427	0.477	0.413	0.499	0.447	0.567	0.706	0.493	0.483	0.498
0.644	0.548	0.667	0.499	0.460	0.542	0.706	0.493	0.484	0.493
0.394	0.380	0.462	0.498	0.396	0.646	0.706	0.496	0.457	0.497
0.415	0.364	0.510	0.500	0.413	0.333	0.456	0.492	0.415	0.500
0.514	0.451	0.571	0.499	0.478	0.485	0.456	0.493	0.453	0.498
0.467	0.406	0.544	0.998	0.470	0.582	0.706	0.496	0.408	0.500
0.446	0.441	0.478	0.498	0.463	0.583	0.706	0.496	0.431	0.500
0.445	0.428	0.489	0.498	0.424	0.627	0.706	0.496	0.420	0.500
0.524	0.400	0.637	0.499	0.435	0.540	0.706	0.493	0.412	0.500
0.539	0.428	0.631	0.499	0.460	0.398	0.206	0.493	0.512	0.496
0.389	0.377	0.457	0.499	0.555	0.403	0.206	0.493	0.524	0.496
0.326	0.328	0.412	0.498	0.438	0.615	0.581	0.495	0.532	0.497
0.658	0.628	0.608	0.498	0.425	0.663	0.706	0.495	0.495	0.498
0.454	0.455	0.477	0.499	0.412	0.591	0.706	0.496	0.485	0.498
0.663	0.548	0.667	0.498	0.453	0.699	0.706	0.496	0.500	0.501
0.394	0.380	0.462	0.498	0.360	0.773	0.706	0.496	0.481	0.500
0.415	0.364	0.510	0.498	0.390	0.751	0.706	0.496	0.644	0.496
0.514	0.451	0.571	0.498	0.402	0.740	0.581	0.496	0.672	0.496
0.467	0.406	0.544	0.498	0.555	0.580	0.706	0.495	0.552	0.497
0.446	0.441	0.478	0.498	0.436	0.708	0.581	0.495	0.514	0.500
0.445	0.428	0.489	0.498	0.478	0.663	0.581	0.495	0.612	0.498
0.524	0.400	0.637	0.498	0.385	0.651	0.706	0.495	0.375	0.508
0.539	0.428	0.631	0.498	0.444	0.599	0.581	0.496	0.437	0.499
0.389	0.377	0.457	0.498	0.386	0.634	0.581	0.496	0.659	0.496
0.395	0.428	0.415	0.498	0.351	0.772	0.581	0.495	0.442	0.503
0.520	0.572	0.458	0.498	0.368	0.769	0.706	0.495	0.581	0.497
0.529	0.545	0.498	0.499	0.514	0.433	0.456	0.493	0.615	0.497

0.480	0.502	0.468	0.499	0.547	0.409	0.456	0.493	0.452	0.502
0.482	0.656	0.466	0.499	0.384	0.441	0.706	0.496	0.614	0.497
0.486	0.515	0.464	0.499	0.436	0.392	0.456	0.494	0.498	0.498
0.564	0.601	0.494	0.499	0.641	0.351	0.206	0.497	0.495	0.499
0.516	0.557	0.468	0.498	0.454	0.689	0.706	0.496	0.480	0.500
0.489	0.491	0.493	0.498	0.498	0.627	0.706	0.496	0.620	0.496
0.508	0.582	0.429	0.498	0.619	0.567	0.706	0.495	0.538	0.499
0.547	0.484	0.586	0.498	0.746	0.365	0.206	0.512	0.434	0.503
0.519	0.602	0.427	0.499	0.350	0.630	0.706	0.496	0.479	0.501
0.488	0.536	0.446	0.499	0.335	0.609	0.706	0.496	0.519	0.500
0.490	0.451	0.534	0.499	0.581	0.414	0.206	0.523	0.460	0.498
0.621	0.455	0.726	0.499	0.537	0.363	0.206	0.500	0.510	0.499
0.517	0.488	0.537	0.499	0.585	0.392	0.206	0.495	0.532	0.499
0.588	0.511	0.621	0.499	0.593	0.449	0.456	0.495	0.509	0.498
0.588	0.523	0.607	0.499	0.567	0.447	0.456	0.495	0.522	0.498
0.446	0.469	0.449	0.498	0.539	0.514	0.706	0.495	0.608	0.498
0.657	0.655	0.579	0.499	0.539	0.478	0.456	0.495	0.452	0.501
0.557	0.617	0.468	0.499	0.425	0.583	0.706	0.496	0.502	0.498
0.520	0.572	0.458	0.498	0.532	0.562	0.581	0.495	0.496	0.499
0.529	0.545	0.498	0.499	0.538	0.397	0.206	0.493	0.546	0.499
0.480	0.502	0.468	0.498	0.760	0.449	0.456	0.495	0.446	0.502
0.482	0.508	0.466	0.498	0.490	0.542	0.581	0.495	0.546	0.499
0.486	0.515	0.464	0.498	0.550	0.616	0.706	0.496	0.578	0.495
0.564	0.601	0.494	0.498	0.464	0.683	0.706	0.495	0.656	0.496
0.516	0.557	0.468	0.498	0.640	0.452	0.456	0.495	0.668	0.496
0.489	0.491	0.493	0.498	0.313	0.810	0.706	0.496	0.666	0.495
0.508	0.582	0.429	0.498	0.573	0.596	0.581	0.495	0.531	0.499
0.547	0.484	0.586	0.499	0.550	0.333	0.206	0.492	0.546	0.499
0.519	0.602	0.427	0.499	0.567	0.348	0.206	0.497	0.523	0.499
0.488	0.536	0.446	0.498	0.657	0.414	0.456	0.523	0.544	0.496
0.490	0.451	0.534	0.499	0.567	0.349	0.206	0.497	0.532	0.497
0.621	0.455	0.726	0.499	0.439	0.399	0.456	0.493	0.548	0.496
0.463	0.490	0.454	0.498	0.657	0.414	0.456	0.523	0.552	0.496
0.661	0.616	0.625	0.498	0.619	0.493	0.456	0.495	0.518	0.497
0.544	0.509	0.556	0.498	0.538	0.572	0.581	0.495	0.520	0.497

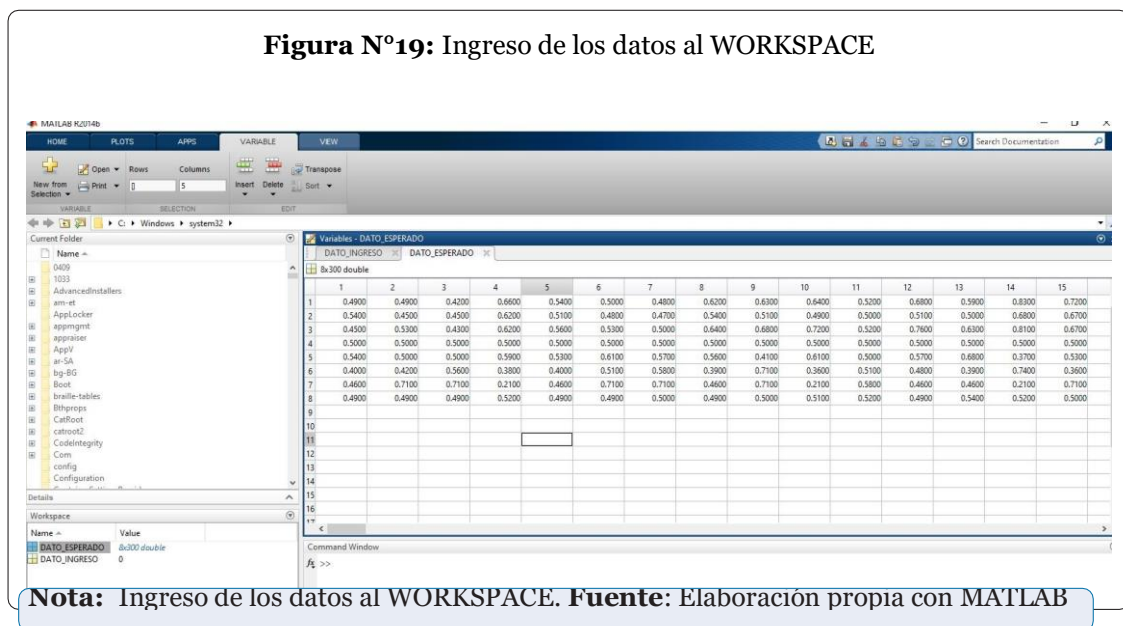
0.503	0.476	0.528	0.498	0.593	0.532	0.706	0.495	0.600	0.496
0.480	0.466	0.504	0.498	0.599	0.523	0.581	0.495	0.594	0.497
0.619	0.541	0.636	0.499	0.451	0.555	0.706	0.493	0.512	0.500
0.632	0.512	0.685	0.499	0.544	0.453	0.456	0.495	0.471	0.501
0.641	0.490	0.720	0.498	0.585	0.554	0.706	0.495	0.462	0.501
0.515	0.502	0.521	0.498	0.443	0.575	0.706	0.496	0.475	0.501
0.326	0.328	0.412	0.498	0.455	0.635	0.706	0.496	0.467	0.501
0.427	0.477	0.413	0.499	0.416	0.484	0.456	0.493	0.481	0.501
0.517	0.488	0.537	0.498	0.442	0.571	0.581	0.493	0.460	0.499
0.588	0.511	0.621	0.499	0.422	0.395	0.206	0.493	0.664	0.494
0.588	0.523	0.607	0.500	0.377	0.385	0.206	0.493	0.646	0.494
0.498	0.527	0.469	0.500	0.394	0.370	0.456	0.501	0.671	0.495
0.498	0.527	0.469	0.499	0.514	0.434	0.206	0.516	0.386	0.505
0.446	0.469	0.449	0.498	0.597	0.466	0.456	0.493	0.273	0.505
0.657	0.655	0.579	0.499	0.529	0.411	0.456	0.495	0.362	0.507
0.557	0.617	0.468	0.499	0.492	0.392	0.456	0.493	0.401	0.504
0.520	0.572	0.458	0.499	0.518	0.371	0.456	0.507	0.385	0.503
0.529	0.545	0.498	0.499	0.535	0.363	0.456	0.578	0.330	0.506
0.480	0.502	0.468	0.499	0.499	0.332	0.206	0.492	0.323	0.505
0.482	0.508	0.466	0.499	0.536	0.462	0.456	0.523	0.654	0.496
0.486	0.515	0.464	0.499	0.551	0.357	0.206	0.497	0.619	0.495
0.564	0.601	0.494	0.499	0.533	0.414	0.206	0.507	0.632	0.496
0.516	0.557	0.468	0.499	0.564	0.381	0.456	0.493	0.583	0.495
0.489	0.491	0.493	0.499	0.587	0.366	0.206	0.545	0.624	0.496
0.508	0.582	0.429	0.499	0.470	0.392	0.456	0.493	0.585	0.495
0.547	0.484	0.586	0.499	0.574	0.364	0.206	0.992	0.614	0.497
0.519	0.602	0.442	0.499	0.469	0.394	0.456	0.493	0.560	0.496

Fuente: Elaboración Propia realizado con el programa Win edit

3.9.3 Exportación de los datos del WORKSPACE a la nntool

Primeramente se utilizó la técnica del procesamiento de datos utilizando hojas de cálculo para ordenar y comodar los parámetros de las entradas a la red neuronal luego se exportó al WORKSPACE (área de trabajo de MATLAB) una vez ordenado como matriz en número de filas y columnas compatibles para su procesamiento de datos se exportó al nntool(network neural tool) mas conocido como herramientas de redes neuronales para el diseño de la arquitectura de la red.

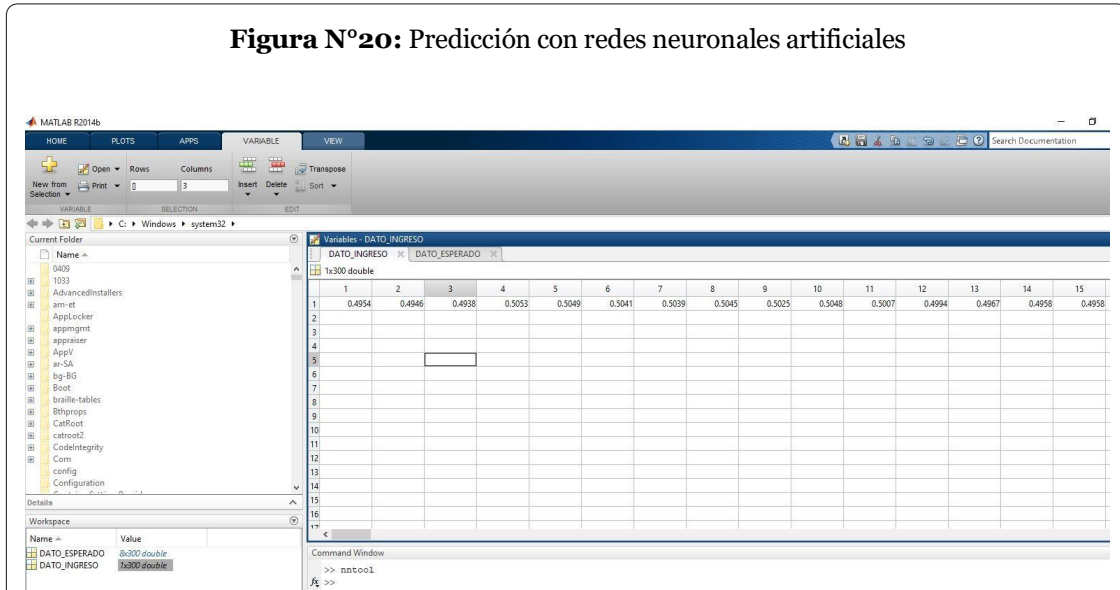
Figura N°19: Ingreso de los datos al WORKSPACE



Nota: Ingreso de los datos al WORKSPACE. **Fuente:** Elaboración propia con MATLAB

El ingreso de los datos previa normalización se cuentan con datos esperados como objetivo para el aprendizaje y para predecir los valores de la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptimo, los cuales serán predecidos por a red neuronal artificial donde podemos apreciar el ingreso de los datos al WORKSPACE para la utilización del nntool y del nftool herramientas y espacio de trabajo para redes neuronales con MATLAB.

Figura N°20: Predicción con redes neuronales artificiales

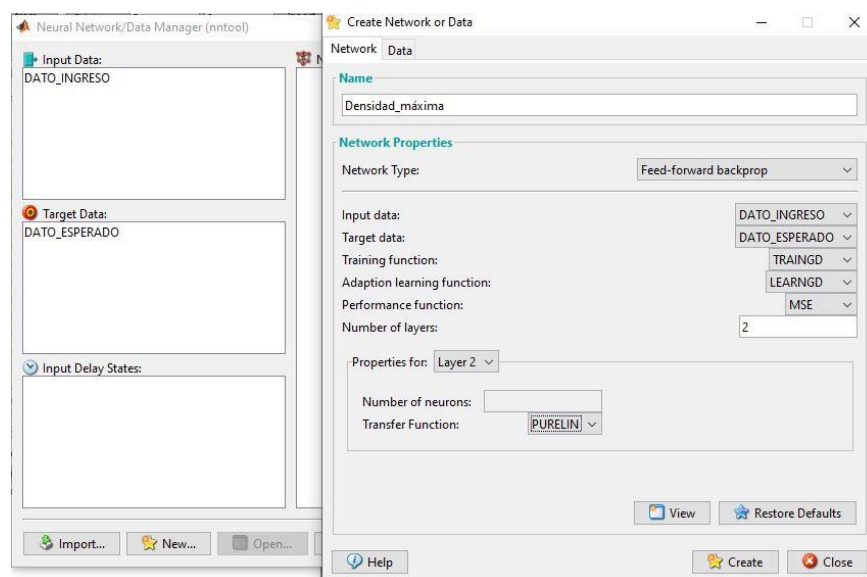


Nota: Predicción con redes neuronales artificiales. **Fuente:** Elaboración propia con MATLAB

3.9.4 Creación de la arquitectura de la red neuronal artificial

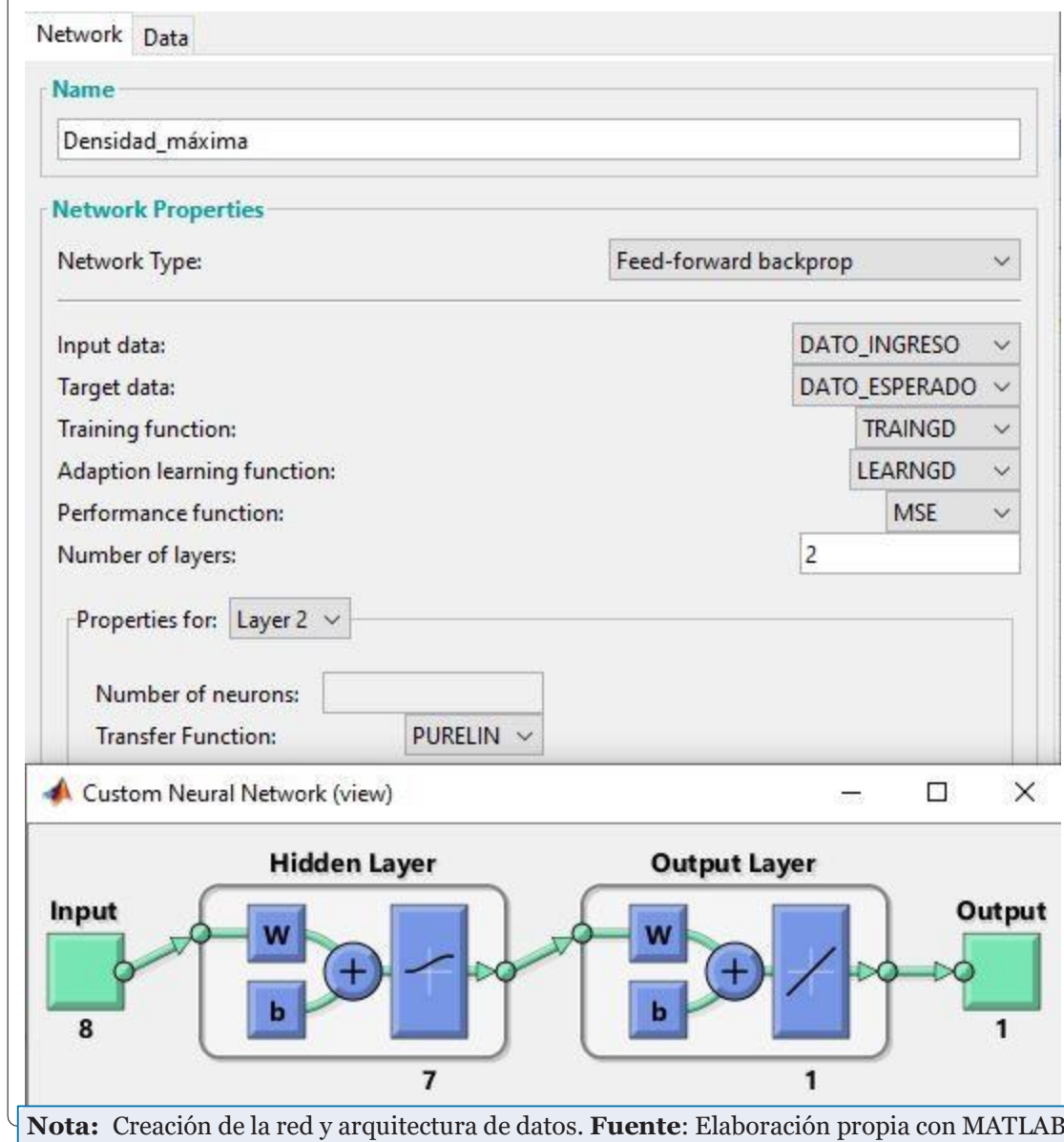
La herramienta de MATLAB imprescindible para redes neuronales artificiales es el nntool (network neural tool), herramientas de redes neuronales artificiales, el cual se encarga de crear la arquitectura de la red el ingreso de los datos del WORKSPACE a la herramienta nntool y la configuración para el ingreso de los datos.

Figura N°21: Exportación de los datos del workspace al nntool de MATLAB



Nota: Exportación de los datos de l workspace al nntool de MATLAB. **Fuente:** Elaboración propia

Figura N°22: Creación de la red y arquitectura de



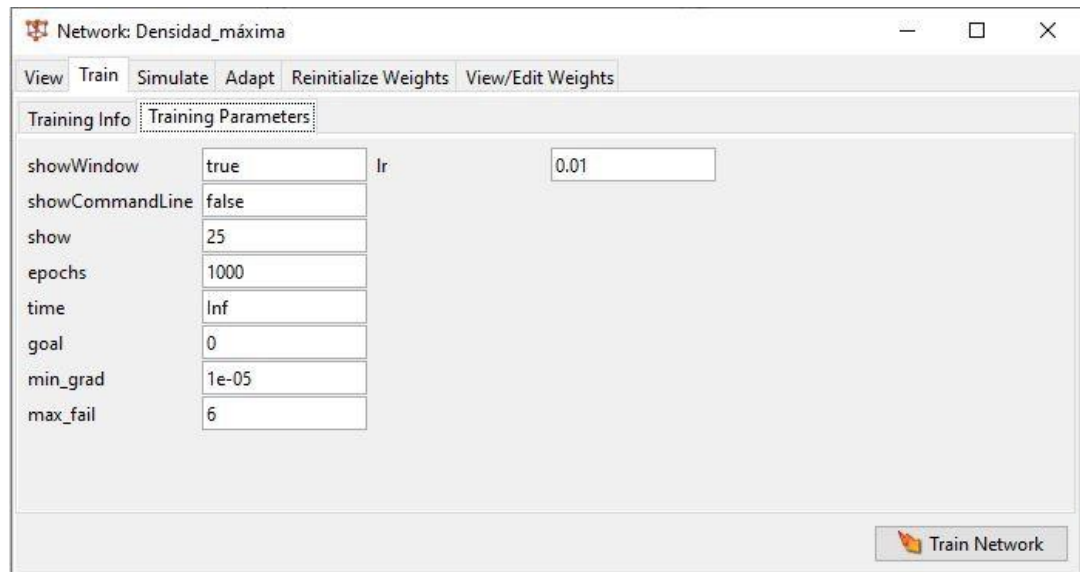
La arquitectura de la red tiene 3 capas una capa de entrada o input layer, la capa oculta o hidden layer y la capa de salida output layer donde se utiliza la función de activación lineal para el ingreso a la capa oculta tanto como a la capa de salida, donde tenemos 7 neuronas en la capa oculta como se aprecia en la arquitectura de la red y para salida o output layer tenemos una sola neurona, donde tenemos 8 parámetros de entrada a la red y una de salida.

3.9.5 Configuración para el entrenamiento de la red

Luego de exportar los datos normalizados al WORKSPACE, los datos necesitan dividirse en tres grupos, donde el primer grupo es para el entrenamiento de la red neuronal artificial

el segundo la validación y el tercero la prueba, tributando el 80 % para entrenamiento y el 20 % para la validación y la prueba del total de datos recolectados, podemos configurar los parámetros del entrenamiento para la iteración teniendo en cuenta las épocas de procesamiento de datos a tomar, el error cuadrático medio, etc.

Figura N°23: Configuración de los parametros de entrenamiento

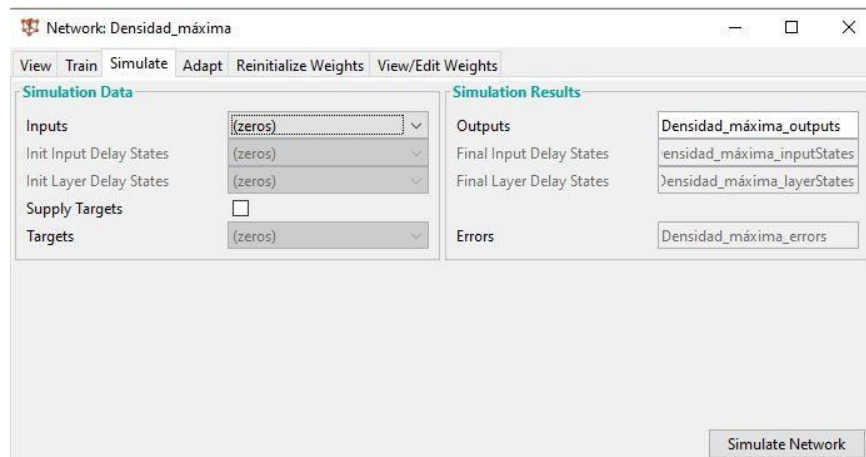


Nota: Configuración de los parametros de entrenamiento. **Fuente:** Elaboración propia con MATLAB

Luego del entrenamiento una vez validado la red neuronal artificial la red ya aprendió y por lo tanto predecirá los datos hasta alcanzar el error cuadrático medio proximo a cero, luego la simulación se realiza con las entradas de los datos de interés a predecir para los parámetros de ingreso a la red obteniendo una red optima para la obtención de resultados de interés.

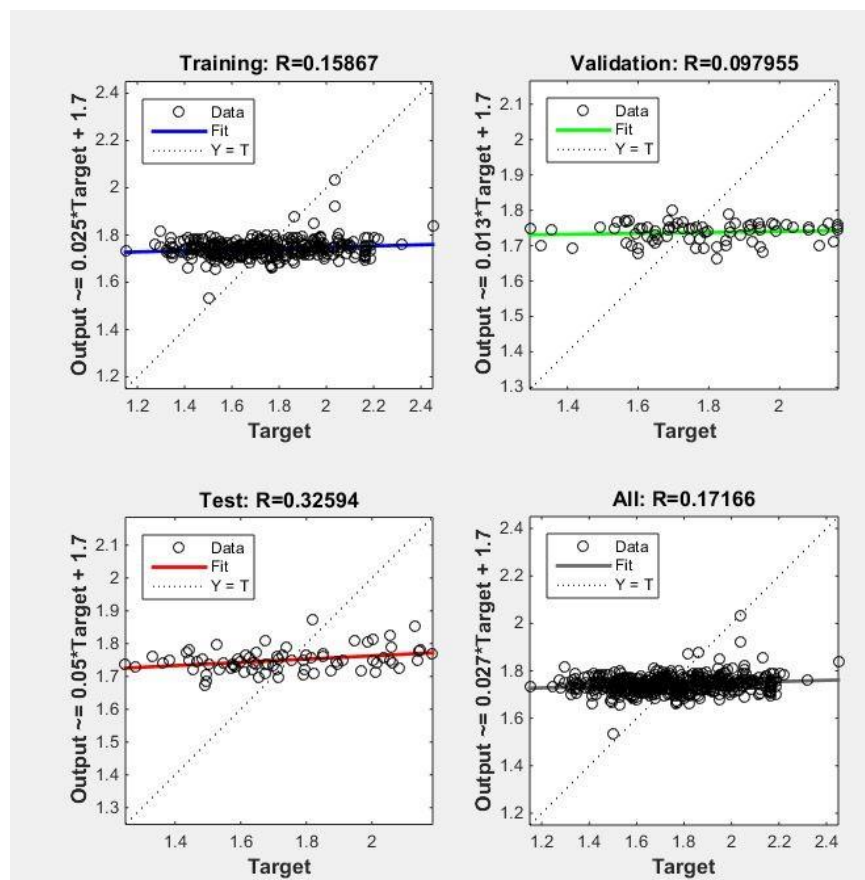
Los valores de la red neuronal artificial tendrán una tendencia en función a los datos donde se controlará con la regresión lineal y el mejor rendimiento de la validación y finalmente una vez obtenido los datos generados por la red neurona artificial pasamos a exportar los datos al WORKSPACE para su utilización en algún tema de interés.

Figura N°24: Validación de la red neuronal para la prueba



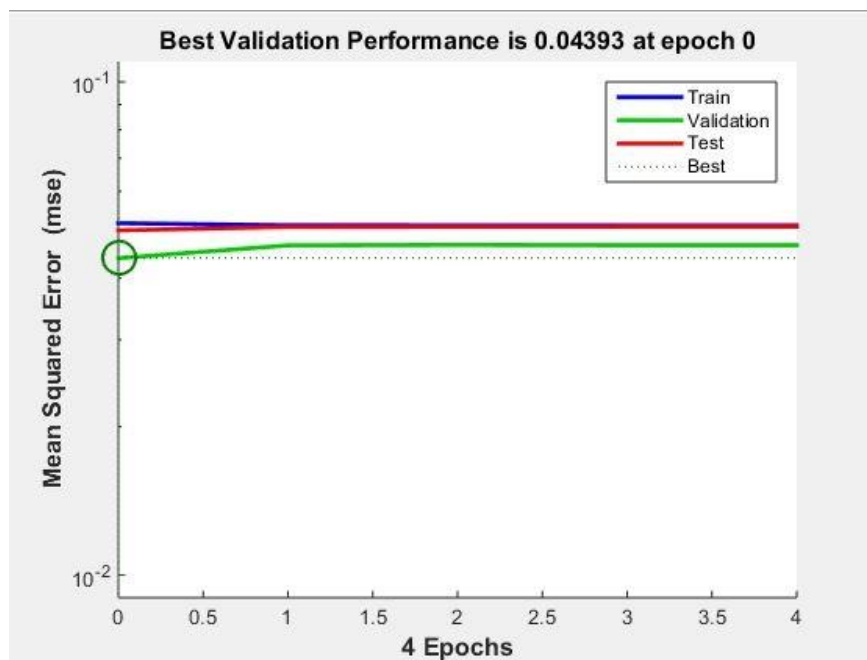
Nota: Validación de la red neuronal para la prueba. **Fuente:** Elaboración propia con MATLAB

Figura N°25: Regresión lineal de los datos de ingreso a la red



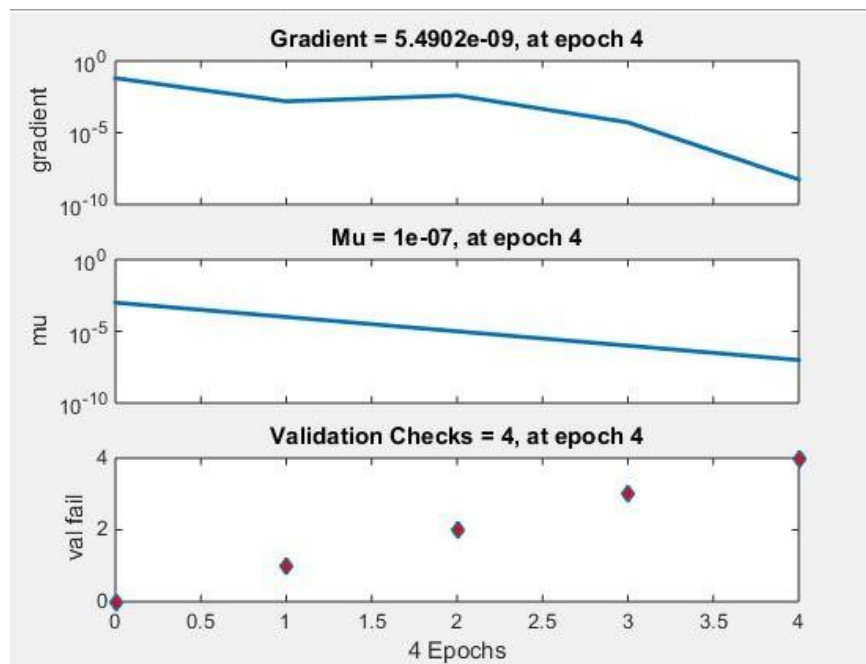
Nota: Regresión lineal de los datos de ingreso a la red neuronal. **Fuente:** Elaboración propia con MATLAB

Figura N°26: Rendimiento y desempeño de la



Nota: Desempeño de la red. **Fuente:** Elaboración propia con MATLAB

Figura N°27: Descenso de gradiente y validación por épocas



Nota: Descenso de gradiente y validación por épocas. **Fuente:** Elaboración propia con MATLAB

“Queda prohibido no sonreír a los problemas, no luchar por lo que quieres, abandonarlo todo por miedo, no convertir en realidad tus sueños”

— Pablo Neruda

Capítulo

IV

RESULTADOS

4.1 Resultados

- ☞ Se Determinaron los objetivos para los parámetros de compactación en suelos de subrasante utilizando redes neuronales artificiales supervisadas en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021, como se muestra en la tabla N° 4.2 y 4.4.
- ☞ Se cumplió con estimar parámetros de compactación en suelos de subrasante a partir de la granulométrica utilizando redes neuronales artificiales supervisadas en la pavimentación de la av. Ejército, donde tenemos los datos de entrada para la granulometría en la tabla N° 4.2 y 4.4
- ☞ Se cumplió con estimar parámetros de compactación en suelos de subrasante a partir de los límites de Attemberg utilizando redes neuronales artificiales supervisadas en la pavimentación de la av Ejercito, donde se puede apreciar los datos de los límites de Attemberg como datos de ingreso en las tablas N° 4.2 y 4.4.
- ☞ Se logró el objetivo de estimar parámetros de compactación en suelos de subrasante a partir de la clasificación de suelos SUCS Y ASSTHO utilizando redes neuronales artificiales supervisadas en la pavimentación de la av. Ejército Ayacucho, 2021, consignando el tipo de suelos en la red neuronal artificial, donde se puede apreciar los datos de la clasificación de suelos como datos de ingreso en las tablas N° 4.2 y 4.4.
- ☞ Se utilizaron 3 capas para la red neuronal la capa de entrada o input Layer, la capa oculta o llamada Hidden Layer y finalmente para la salida la capa output Layer o

capa de salida, y para la capa oculta y de salida se utilizó la función de activación lineal donde se utilizó 7 neuronas artificiales en la capa oculta hasta ajustar el error cuadrático medio con aproximación a cero .

Tabla N°12: Densidad seca máxima(gr/cm³) y la densidad generada por la Red Neuronal Artificial y el error cuadrático medio

Dens. Máxima Seca	RNA	Error	Dens. Máxima Seca	RNA	Error
1.599	1.713	-0.114	1.516	1.747	-0.231
1.788	1.748	0.040	1.857	1.732	0.125
1.532	1.707	-0.175	1.713	1.761	-0.048
1.443	1.764	-0.321	1.930	1.761	0.169
2.114	1.768	0.346	1.770	1.758	0.012
1.740	1.784	-0.044	1.864	1.755	0.109
1.691	1.757	-0.066	1.778	1.760	0.018
2.138	1.767	0.371	1.968	1.747	0.221
2.030	1.768	0.262	1.794	1.729	0.065
2.030	1.757	0.273	1.583	1.744	-0.161
2.035	1.742	0.293	1.512	1.749	-0.237
1.548	1.748	-0.200	1.599	1.734	-0.135
1.331	1.738	-0.407	1.573	1.789	-0.216
2.166	1.744	0.422	1.294	1.763	-0.469
2.011	1.717	0.294	1.592	1.730	-0.138
2.176	1.784	0.392	1.458	1.747	-0.289
1.891	1.747	0.144	2.166	1.723	0.443
1.985	1.808	0.177	2.084	1.740	0.344
1.895	1.785	0.110	2.166	1.730	0.436
1.891	1.765	0.126	2.084	1.741	0.343
1.985	1.777	0.208	2.054	1.758	0.296
1.895	1.717	0.178	1.915	1.756	0.159
2.095	1.757	0.338	1.700	1.759	-0.059
1.599	1.729	-0.130	1.625	1.763	-0.138
1.788	1.690	0.098	1.582	1.719	-0.137
1.532	1.793	-0.261	1.526	1.731	-0.205
1.443	1.755	-0.312	1.455	1.754	-0.299
1.989	1.747	0.242	1.600	1.765	-0.165

1.506	1.743	-0.237	1.456	1.706	-0.250
1.526	1.746	-0.220	1.416	1.737	-0.321
1.443	1.763	-0.320	1.636	1.753	-0.117
1.532	1.740	-0.208	1.650	1.722	-0.072
1.788	1.728	0.060	1.528	1.673	-0.145
1.599	1.711	-0.112	1.700	1.751	-0.051
2.095	1.767	0.328	1.594	1.745	-0.151
1.637	1.734	-0.097	1.432	1.732	-0.300
1.648	1.735	-0.087	1.346	1.749	-0.403
1.640	1.719	-0.079	1.324	1.715	-0.391
2.166	1.698	0.468	1.651	1.717	-0.066
1.526	1.731	-0.205	1.597	1.732	-0.135
1.506	1.778	-0.272	1.553	1.723	-0.170
1.989	1.723	0.266	1.862	1.979	-0.117
1.637	1.752	-0.115	1.746	1.707	0.039
1.648	1.784	-0.136	1.726	1.782	-0.056
1.640	1.755	-0.115	1.910	1.779	0.131
2.054	1.705	0.349	1.829	1.722	0.107
1.532	1.770	-0.238	1.680	1.809	-0.129
1.443	1.768	-0.325	1.582	1.790	-0.208
1.448	1.765	-0.317	1.540	1.775	-0.235
1.448	1.794	-0.346	1.475	1.805	-0.330
1.599	1.755	-0.156	1.341	1.761	-0.420
1.532	1.757	-0.225	2.163	1.759	0.404
1.443	1.757	-0.314	2.147	1.760	0.387
2.063	1.754	0.309	2.123	1.705	0.418
1.944	1.752	0.192	1.640	1.763	-0.123
1.432	1.714	-0.282	1.514	1.753	-0.239
2.166	1.731	0.435	1.456	1.779	-0.323
2.095	1.730	0.365	1.785	1.712	0.073
1.599	1.719	-0.120	1.635	1.736	-0.101
1.560	1.730	-0.170	1.568	1.780	-0.212
1.754	1.740	0.014	1.725	1.748	-0.023
1.861	1.807	0.054	1.648	1.761	-0.113
1.532	1.757	-0.225	1.563	1.775	-0.212

1.443	1.755	-0.312	1.993	1.724	0.269
2.082	1.715	0.367	1.900	1.742	0.158
1.944	1.715	0.229	1.849	1.709	0.140
1.432	1.713	-0.281	1.782	1.724	0.058
2.004	1.728	0.276	1.761	1.743	0.018
1.298	1.723	-0.425	1.674	1.770	-0.096
1.482	1.737	-0.255	1.640	1.728	-0.088
1.443	1.745	-0.302	1.701	1.733	-0.032
2.166	1.753	0.413	1.657	1.777	-0.120
1.698	1.716	-0.018	1.851	1.787	0.064
2.005	1.709	0.296	1.754	1.764	-0.010
1.841	1.740	0.101	1.710	1.758	-0.048
1.711	1.732	-0.021	2.054	1.812	0.242
1.689	1.767	-0.078	1.955	1.730	0.225
1.731	1.758	-0.027	1.916	1.738	0.178
1.765	1.760	0.005	2.123	1.774	0.349
1.900	1.749	0.151	1.962	1.754	0.208
1.743	1.755	-0.012	1.920	1.763	0.157
1.728	1.792	-0.064	1.978	1.777	0.201
2.002	1.836	0.166	1.876	1.795	0.081
2.076	1.779	0.297	1.790	1.701	0.089
1.695	1.833	-0.138	1.973	1.769	0.204
2.166	1.765	0.401	2.030	1.758	0.272
2.010	1.743	0.267	1.754	1.749	0.005
1.822	1.781	0.041	1.710	1.737	-0.027
1.910	1.742	0.168	1.719	1.783	-0.064
2.203	1.791	0.412	1.675	1.798	-0.123
2.066	1.768	0.298	1.635	1.742	-0.107
1.509	1.740	-0.231	1.935	1.776	0.159
1.467	1.755	-0.288	1.792	1.714	0.078
1.965	1.728	0.237	1.758	1.789	-0.031
1.948	1.785	0.163	1.984	1.756	0.228
1.976	1.738	0.238	1.946	1.825	0.121
1.947	1.760	0.187	1.928	1.721	0.207
1.957	1.753	0.204	1.986	1.768	0.218

1.974	1.770	0.204	1.900	1.762	0.138
1.950	1.738	0.212	1.605	1.769	-0.164
1.727	1.750	-0.023	1.326	1.740	-0.414
1.855	1.785	0.070	1.276	1.759	-0.483
1.551	1.742	-0.191	1.559	1.767	-0.208
1.548	1.764	-0.216	1.416	1.758	-0.342
1.493	1.730	-0.237	1.362	1.742	-0.380
1.684	1.763	-0.079	2.054	1.771	0.283
1.780	1.795	-0.015	1.978	1.700	0.278
1.611	1.753	-0.142	1.915	1.743	0.172
1.708	1.707	0.001	2.166	1.741	0.425
1.670	1.711	-0.041	2.110	1.758	0.352
1.696	1.766	-0.070	2.086	1.767	0.319
1.699	1.740	-0.041	1.602	1.729	-0.127
1.627	1.717	-0.090	1.400	1.752	-0.352
1.520	1.730	-0.210	1.352	1.714	-0.362
1.617	1.711	-0.094	1.640	1.687	-0.047
1.501	1.500	0.001	1.534	1.697	-0.163
1.560	1.742	-0.182	1.473	1.715	-0.242
1.533	1.728	-0.195	1.430	1.711	-0.281
1.512	1.708	-0.196	1.648	1.723	-0.075
1.770	1.678	0.092	1.552	1.721	-0.169
1.801	1.697	0.104	1.530	1.708	-0.178
1.823	1.703	0.120	1.851	1.733	0.118
1.727	1.750	-0.023	1.749	1.725	0.024
1.700	1.745	-0.045	1.770	1.712	0.058
1.740	1.674	0.066	1.648	1.740	-0.092
1.691	1.692	-0.001	1.626	1.718	-0.092
2.114	1.683	0.431	1.346	1.716	-0.370
2.186	1.680	0.506	1.249	1.757	-0.508
1.876	1.720	0.156	1.723	1.747	-0.024
1.776	1.701	0.075	1.671	1.725	-0.054
2.030	1.704	0.326	1.610	1.735	-0.125
1.415	1.687	-0.272	1.654	1.718	-0.064
1.577	1.690	-0.113	1.549	1.731	-0.182

2.153	1.703	0.450	1.500	1.730	-0.230
1.588	1.697	-0.109	1.680	1.730	-0.050
1.951	1.744	0.207	1.578	1.712	-0.134
2.039	1.760	0.279	1.515	1.713	-0.198
1.615	1.759	-0.144	2.011	1.691	0.320
2.037	2.009	0.028	1.903	1.738	0.165
1.735	1.768	-0.033	1.880	1.714	0.166
1.727	1.761	-0.034	1.909	1.716	0.193
1.687	1.754	-0.067	1.800	1.743	0.057
2.052	1.744	0.308	1.765	1.679	0.086
1.839	1.790	0.049	1.432	1.759	-0.327
1.569	1.722	-0.153	1.385	1.730	-0.345
1.686	1.785	-0.099	1.346	1.681	-0.335
1.788	1.769	0.019	1.721	1.726	-0.005
1.636	1.723	-0.087	1.638	1.699	-0.061
1.767	1.679	0.088	1.592	1.732	-0.140
1.823	1.713	0.110	1.550	1.733	-0.183
1.762	1.725	0.037	1.710	1.743	-0.033
1.796	1.731	0.065	1.652	1.748	-0.096
2.020	1.768	0.252	1.615	1.761	-0.146
1.614	1.765	-0.151	1.673	1.744	-0.071
1.745	1.790	-0.045	1.576	1.739	-0.163
1.729	1.767	-0.038	1.552	1.733	-0.181
1.860	1.734	0.126	1.703	1.736	-0.033
1.600	1.752	-0.152	1.625	1.727	-0.102
1.860	1.752	0.108	1.540	1.738	-0.198
1.942	1.757	0.185	1.520	1.743	-0.223
2.145	1.761	0.384	1.764	1.748	0.016
2.176	1.765	0.411	1.675	1.725	-0.050
2.172	1.708	0.464	1.648	1.752	-0.104
1.820	1.768	0.052	1.567	1.750	-0.183
1.860	1.713	0.147	1.482	1.726	-0.244
1.800	1.775	0.025	1.429	1.732	-0.303
1.854	1.795	0.059	1.617	1.768	-0.151
1.822	1.715	0.107	1.740	1.753	-0.013

1.865	1.700	0.165	1.690	1.749	-0.059
1.875	1.781	0.094	1.675	1.717	-0.042
1.786	1.743	0.043	1.732	1.707	0.025
1.793	1.730	0.063	1.673	1.732	-0.059
2.001	1.751	0.250	1.685	1.740	-0.055
1.983	1.738	0.245	1.860	1.773	0.087
1.771	1.741	0.030	1.795	1.752	0.043
1.665	1.712	-0.047	1.750	1.743	0.007
1.640	1.713	-0.073	2.054	1.755	0.299
1.676	1.751	-0.075	1.910	1.739	0.171
1.654	1.716	-0.062	2.166	1.796	0.370
1.691	1.749	-0.058	2.054	1.803	0.251
1.635	1.727	-0.092	1.974	1.759	0.215
2.166	1.702	0.464	1.947	1.715	0.232
2.119	1.710	0.409	1.876	1.706	0.170
2.185	1.780	0.405	1.947	1.835	0.112
1.443	1.746	-0.303	1.875	1.745	0.130
1.150	1.743	-0.593	2.016	1.751	0.265
1.380	1.778	-0.398	1.478	1.742	-0.264
1.482	1.793	-0.311	1.341	1.732	-0.391
1.440	1.798	-0.358	1.530	1.748	-0.218
1.298	1.841	-0.543	1.410	1.736	-0.326
1.280	1.741	-0.461	1.507	1.744	-0.237
2.140	1.774	0.366	1.385	1.760	-0.375
2.050	1.744	0.306	1.525	1.778	-0.253
2.082	1.757	0.325	1.340	1.804	-0.464
1.956	1.779	0.177	1.524	1.757	-0.233
2.063	1.768	0.295	1.503	1.743	-0.240
1.962	1.791	0.171	1.860	1.752	0.108
2.037	2.103	-0.066	1.860	1.775	0.085
1.895	1.812	0.083	1.812	1.748	0.064
2.054	1.775	0.279	1.525	1.780	-0.255
1.960	1.765	0.195	1.865	1.775	0.090
1.910	1.757	0.153	1.852	1.779	0.073
1.550	1.755	-0.205	1.745	1.791	-0.046

1.470	1.746	-0.276	1.645	1.766	-0.121
1.356	1.754	-0.398	1.600	1.746	-0.146
1.650	1.743	-0.093	1.498	1.707	-0.209
1.570	1.740	-0.170	1.470	1.745	-0.275
1.536	1.697	-0.161	1.811	1.763	0.048
1.600	1.699	-0.099	1.745	1.738	0.007
1.710	1.769	-0.059	1.548	1.721	-0.173
1.584	1.694	-0.110	1.435	1.768	-0.333
1.956	1.773	0.183	1.350	1.736	-0.386
1.765	1.663	0.102	1.684	1.744	-0.060
2.047	1.808	0.239	1.611	1.740	-0.129
1.935	1.766	0.169	1.500	1.722	-0.222
1.819	1.879	-0.060	1.462	1.721	-0.259
1.966	1.726	0.240	1.626	1.755	-0.129
1.836	1.754	0.082	1.459	1.768	-0.309
1.814	1.761	0.053	1.395	1.776	-0.381
1.680	1.722	-0.042	1.700	1.731	-0.031
1.578	1.715	-0.137	1.628	1.720	-0.092
1.495	1.707	-0.212	1.600	1.732	-0.132
1.570	1.719	-0.149	1.512	1.707	-0.195
1.496	1.703	-0.207	1.400	1.745	-0.345
1.412	1.674	-0.262	1.819	1.751	0.068
1.800	1.694	0.106	1.709	1.721	-0.012
1.715	1.718	-0.003	1.781	1.756	0.025
1.676	1.673	0.003	1.709	1.715	-0.006
1.910	1.744	0.166	1.781	1.701	0.080
1.824	1.682	0.142	1.636	1.739	-0.103
1.768	1.686	0.082	1.927	1.734	0.193
1.650	1.774	-0.124	1.765	1.725	0.040
1.580	1.728	-0.148	1.700	1.751	-0.051
1.493	1.684	-0.191	1.849	1.733	0.116
1.620	1.749	-0.129	1.993	1.720	0.273
1.570	1.739	-0.169	2.186	1.749	0.437
1.490	1.696	-0.206	1.979	1.751	0.228
1.952	1.697	0.255	2.166	1.721	0.445

1.825	1.723	0.102	1.752	1.731	0.021
1.800	1.739	0.061	2.186	1.779	0.407
1.945	1.771	0.174	1.852	1.751	0.101
1.566	1.728	-0.162	1.982	1.740	0.242
1.324	1.745	-0.421	1.425	1.768	-0.343
1.922	1.721	0.201	1.910	1.759	0.151
1.786	1.691	0.095	2.320	1.767	0.553
1.893	1.742	0.151	2.130	1.853	0.277
1.790	1.749	0.041	2.450	1.807	0.643
1.585	1.760	-0.175	2.220	1.784	0.436
1.793	1.767	0.026	2.060	1.782	0.278
1.528	1.787	-0.259			

Fuente: Elaboración Propia utilizando Win edit

Tabla N°13: Densidad seca máxima(gr/cm³) y la densidad generada por la Red Neuronal Artificial y el error cuadrático medio

Muestras	C-1	C-2	C-3	C-4
Límite líquido	22.13	25.79	29.35	27.62
Límite plástico	13.99	13.96	18.89	18.53
Indice de plasticidad	8.15	11.84	10.46	9.1
% Grava	35.22	34.12	64.14	51.29
% Arena	46.61	50.24	23.42	41.38
% fina	18.17	15.64	12.44	7.33
AASTHO_N	22	22	22	20
SUCS_N	8	8	4	31
Densidad Máxima seca(gr/cm³)	2.004	1.925	1.651	1.933
Dens. Máx. RNA(gr/cm³)	1.734	1.725	1.751	1.733

Fuente: Elaboración Propia utilizando Win edit

Tabla N°14: Contenido de humedad óptimo(%) y la densidad generada por la Red Neuronal Artificial y el error cuadrático medio

Cont. Humedad(%)	RNA	Error	Cont. Humedad(%)	RNA	Error
22.450	17.211	5.239	12.250	12.994	-0.744
9.750	17.115	-7.365	10.970	17.160	-6.190
16.300	16.003	0.297	9.640	11.697	-2.057
19.490	20.819	-1.329	10.700	8.567	2.133
8.400	11.717	-3.317	10.620	9.510	1.110
18.500	25.509	-7.009	11.730	21.392	-9.662
17.050	12.378	4.672	10.120	11.052	-0.932
6.850	15.742	-8.892	11.050	4.278	6.772
7.350	11.913	-4.563	8.590	18.709	-10.119
7.350	21.930	-14.580	13.810	19.692	-5.882
8.720	17.289	-8.569	12.380	19.747	-7.367
21.960	17.534	4.426	12.530	13.048	-0.518
42.000	17.162	24.838	12.740	16.831	-4.091
4.370	17.187	-12.817	11.490	5.912	5.578
6.880	17.130	-10.250	12.830	19.427	-6.597
6.240	21.129	-14.889	11.520	10.445	1.075
10.850	12.769	-1.919	8.370	14.832	-6.462
9.180	13.309	-4.129	7.560	17.718	-10.158
7.850	14.650	-6.800	7.370	15.836	-8.466
10.850	13.253	-2.403	8.580	17.684	-9.104
9.180	15.177	-5.997	6.330	17.197	-10.867
7.850	17.138	-9.288	7.470	13.208	-5.738
8.650	7.545	1.105	22.450	19.852	2.598
22.450	17.497	4.953	20.410	19.807	0.603
9.750	17.122	-7.372	19.340	16.327	3.013
16.300	11.905	4.395	13.700	12.202	1.498
19.490	17.147	2.343	12.120	8.331	3.789
7.470	9.069	-1.599	16.020	25.128	-9.108
19.050	6.898	12.152	14.230	17.360	-3.130
25.700	10.715	14.985	11.260	17.218	-5.958
19.490	6.962	12.528	18.300	22.298	-3.998
16.300	12.932	3.368	10.300	9.238	1.062
9.750	9.367	0.383	9.340	6.963	2.377
22.450	4.930	17.520	9.800	13.531	-3.731

8.650	3.979	4.671	7.470	16.271	-8.801
18.510	16.172	2.338	19.900	15.633	4.267
20.090	20.928	-0.838	16.620	20.215	-3.595
21.280	21.623	-0.343	9.370	14.038	-4.668
4.370	17.841	-13.471	13.570	17.373	-3.803
25.700	17.551	8.149	12.280	26.627	-14.347
19.050	17.059	1.991	12.030	17.564	-5.534
7.470	17.175	-9.705	10.510	23.378	-12.868
18.510	10.197	8.313	9.460	16.201	-6.741
20.090	17.013	3.077	9.040	10.332	-1.292
21.280	17.697	3.583	9.600	15.207	-5.607
6.330	12.307	-5.977	9.620	9.610	0.010
16.300	17.978	-1.678	17.200	12.205	4.995
19.490	13.638	5.852	16.300	13.033	3.267
34.630	18.250	16.380	15.030	10.070	4.960
34.630	20.212	14.418	16.220	16.037	0.183
22.450	15.636	6.814	14.160	13.743	0.417
16.300	18.192	-1.892	6.120	9.446	-3.326
19.490	17.549	1.941	7.260	17.295	-10.035
7.540	10.095	-2.555	7.460	17.124	-9.664
6.600	9.451	-2.851	21.280	26.418	-5.138
19.890	17.122	2.768	20.310	19.313	0.997
4.370	17.125	-12.755	19.080	16.658	2.422
8.650	17.123	-8.473	18.600	17.126	1.474
22.450	17.123	5.327	17.260	-0.461	17.721
18.000	17.971	0.029	15.350	19.320	-3.970
12.560	17.150	-4.590	9.730	17.124	-7.394
8.070	8.005	0.065	8.400	10.262	-1.862
16.300	9.626	6.674	7.130	8.605	-1.475
19.490	9.701	9.789	8.870	15.360	-6.490
7.020	17.122	-10.102	7.000	13.482	-6.482
6.600	17.123	-10.523	6.530	12.273	-5.743
19.890	17.122	2.768	5.400	17.126	-11.726
9.800	17.124	-7.324	12.070	13.089	-1.019
30.340	17.123	13.217	11.210	17.445	-6.235

25.770	17.112	8.658	8.000	15.664	-7.664
27.600	12.375	15.225	13.640	16.009	-2.369
4.370	8.404	-4.034	12.300	17.038	-4.738
13.400	17.299	-3.899	8.630	20.384	-11.754
10.600	20.437	-9.837	7.520	20.469	-12.949
16.090	21.943	-5.853	4.000	17.138	-13.138
23.140	11.159	11.981	6.330	12.553	-6.223
21.180	17.383	3.797	5.030	17.161	-12.131
17.570	21.855	-4.285	3.420	12.393	-8.973
21.280	7.303	13.977	6.460	19.949	-13.489
11.820	9.433	2.387	5.380	14.992	-9.612
22.270	11.509	10.761	3.000	9.846	-6.846
16.030	11.582	4.448	10.580	16.668	-6.088
7.600	5.846	1.754	9.120	11.307	-2.187
7.830	14.313	-6.483	5.000	11.556	-6.556
13.400	16.607	-3.207	12.000	17.133	-5.133
4.370	11.020	-6.650	10.720	9.271	1.449
9.480	9.941	-0.461	9.230	13.930	-4.700
17.100	5.985	11.115	6.030	13.126	-7.096
9.710	11.657	-1.947	13.930	7.282	6.648
7.880	6.379	1.501	13.120	19.276	-6.156
7.970	10.120	-2.150	10.050	18.039	-7.989
31.030	18.713	12.317	7.660	16.728	-9.068
26.810	18.652	8.158	6.270	15.954	-9.684
7.790	19.792	-12.002	4.130	17.333	-13.203
7.960	13.773	-5.813	10.210	7.793	2.417
8.220	17.125	-8.905	9.360	17.302	-7.942
8.490	17.585	-9.095	6.150	14.717	-8.567
6.610	9.307	-2.697	10.240	21.212	-10.972
7.710	17.258	-9.548	6.030	17.500	-11.470
7.490	17.184	-9.694	14.990	16.301	-1.311
11.770	8.731	3.039	13.030	8.885	4.145
9.380	20.229	-10.849	7.540	21.544	-14.004
10.170	17.125	-6.955	14.740	30.026	-15.286
22.510	28.300	-5.790	12.310	17.185	-4.875

16.570	17.135	-0.565	8.030	9.528	-1.498
12.440	28.422	-15.982	6.330	21.626	-15.296
18.200	14.755	3.445	6.380	18.437	-12.057
15.230	21.982	-6.752	7.130	17.930	-10.800
10.020	19.097	-9.077	4.370	9.398	-5.028
11.950	17.505	-5.555	6.480	10.905	-4.425
11.710	19.691	-7.981	6.150	16.166	-10.016
7.750	22.521	-14.771	15.000	9.369	5.631
8.860	17.250	-8.390	13.000	10.386	2.614
16.840	25.019	-8.179	10.240	17.127	-6.887
12.300	14.178	-1.878	21.280	17.123	4.157
17.120	27.044	-9.924	20.400	17.123	3.277
16.220	22.043	-5.823	18.000	17.123	0.877
16.090	18.159	-2.069	16.000	14.489	1.511
16.950	22.306	-5.356	20.090	13.912	6.178
8.660	8.966	-0.306	19.230	15.320	3.910
8.550	14.026	-5.476	15.000	16.528	-1.528
9.690	17.156	-7.466	12.820	12.054	0.766
11.840	17.401	-5.561	10.490	14.476	-3.986
12.170	20.623	-8.453	15.720	14.476	1.244
18.500	17.846	0.654	13.420	14.982	-1.562
17.050	17.123	-0.073	14.810	17.146	-2.336
8.400	17.127	-8.727	12.670	17.131	-4.461
8.800	17.114	-8.314	9.730	15.953	-6.223
10.590	30.454	-19.864	13.600	19.528	-5.928
16.550	17.123	-0.573	11.570	17.248	-5.678
11.450	17.128	-5.678	9.030	16.057	-7.027
33.460	25.592	7.868	17.590	18.675	-1.085
15.160	19.796	-4.636	16.040	18.722	-2.682
7.130	17.130	-10.000	12.120	9.260	2.860
22.250	17.123	5.127	18.100	10.624	7.476
10.980	17.128	-6.148	16.350	17.126	-0.776
9.380	5.579	3.801	12.160	17.132	-4.972
19.950	15.951	3.999	5.530	17.123	-11.593
10.100	8.382	1.718	3.470	17.554	-14.084

11.330	12.474	-1.144	2.060	17.124	-15.064
13.540	18.449	-4.909	11.170	17.128	-5.958
16.990	17.323	-0.333	8.000	9.273	-1.273
7.530	19.812	-12.282	6.480	18.631	-12.151
13.410	5.856	7.554	19.900	10.391	9.509
24.190	3.626	20.564	17.320	17.814	-0.494
19.270	17.898	1.372	15.230	17.127	-1.897
17.500	18.577	-1.077	9.060	17.258	-8.198
13.100	8.752	4.348	8.120	17.124	-9.004
14.890	8.499	6.391	7.030	17.148	-10.118
13.610	12.962	0.648	6.000	17.141	-11.141
12.480	11.826	0.654	11.200	17.142	-5.942
13.190	12.368	0.822	10.240	9.890	0.350
12.480	19.796	-7.316	8.120	21.182	-13.062
18.400	13.925	4.475	10.240	16.928	-6.688
12.000	27.757	-15.757	7.640	16.666	-9.026
14.100	11.739	2.361	5.120	17.129	-12.009
13.570	15.916	-2.346	10.880	17.390	-6.510
20.460	1.952	18.508	9.320	17.290	-7.970
13.570	18.031	-4.461	8.230	17.632	-9.402
6.350	20.042	-13.692	6.030	21.384	-15.354
7.690	17.979	-10.289	9.420	12.312	-2.892
6.960	6.402	0.558	8.670	17.141	-8.471
4.930	17.123	-12.193	18.720	22.506	-3.786
13.520	15.435	-1.915	17.120	4.937	12.183
13.570	13.128	0.442	13.420	30.576	-17.156
13.500	22.541	-9.041	9.120	17.332	-8.212
8.660	9.629	-0.969	16.850	25.476	-8.626
9.200	18.227	-9.027	1107.000	28.074	1078.926
8.490	12.133	-3.643	10.000	11.864	-1.864
7.500	8.931	-1.431	7.320	9.996	-2.676
9.750	10.505	-0.755	10.330	6.939	3.391
9.160	20.472	-11.312	12.810	11.147	1.663
7.300	21.807	-14.507	12.090	10.338	1.752
9.810	16.792	-6.982	13.570	10.515	3.055

17.210	22.432	-5.222	12.450	6.902	5.548
19.400	12.064	7.336	8.030	8.739	-0.709
18.200	21.010	-2.810	6.330	9.454	-3.124
19.160	31.078	-11.918	1.230	17.267	-16.037
18.320	17.162	1.158	4.370	16.837	-12.467
18.960	13.489	5.471	6.330	11.231	-4.901
14.560	18.413	-3.853	5.310	9.628	-4.318
4.370	6.385	-2.015	7.320	11.293	-3.973
2.540	8.791	-6.251	5.380	17.126	-11.746
6.430	8.751	-2.321	7.320	15.441	-8.121
27.600	10.503	17.097	5.680	16.223	-10.543
28.430	8.741	19.689	8.210	10.913	-2.703
31.560	19.942	11.618	20.480	15.354	5.126
25.770	11.791	13.979	22.270	18.280	3.990
23.250	12.466	10.784	27.830	20.452	7.378
30.340	9.358	20.982	16.150	18.251	-2.101
27.560	17.390	10.170	20.440	20.289	0.151
6.700	10.212	-3.512	18.450	19.129	-0.679
5.370	21.319	-15.949	20.820	17.755	3.065
7.080	14.569	-7.489	27.980	19.768	8.212
8.560	11.645	-3.085	21.460	17.641	3.819
7.190	16.706	-9.516	21.330	16.444	4.886
6.420	6.732	-0.312	13.570	11.199	2.371
10.500	-1.270	11.770	13.570	12.539	1.031
8.450	6.189	2.261	13.000	9.625	3.375
6.330	3.377	2.953	20.820	10.918	9.902
4.620	14.631	-10.011	13.570	17.298	-3.728
2.860	22.306	-19.446	6.540	18.795	-12.255
28.200	4.724	23.476	4.560	13.221	-8.661
27.520	13.100	14.420	2.310	2.223	0.087
25.640	17.067	8.573	20.460	16.168	4.292
25.170	28.205	-3.035	18.120	17.122	0.998
26.530	15.386	11.144	13.580	17.872	-4.292
22.120	26.688	-4.568	12.150	10.242	1.908
27.120	12.348	14.772	10.520	17.313	-6.793

18.140	24.745	-6.605	22.530	17.125	5.405
15.230	10.297	4.933	21.120	13.510	7.610
9.290	18.660	-9.370	17.250	17.255	-0.005
7.340	14.582	-7.242	12.440	10.879	1.561
7.310	17.444	-10.134	15.230	17.329	-2.099
6.580	13.306	-6.726	14.000	8.875	5.125
4.230	4.037	0.193	12.350	17.133	-4.783
10.500	11.075	-0.575	11.380	19.443	-8.063
9.560	19.736	-10.176	10.010	23.377	-13.367
7.460	6.144	1.316	8.450	1.134	7.316
18.000	13.215	4.785	12.180	18.953	-6.773
14.380	11.052	3.328	11.100	14.154	-3.054
12.430	6.687	5.743	9.000	17.510	-8.510
23.000	21.079	1.921	16.960	17.125	-0.165
21.130	18.280	2.850	15.000	15.635	-0.635
19.430	8.989	10.441	16.440	15.028	1.412
12.000	6.360	5.640	19.250	17.130	2.120
10.320	12.332	-2.012	17.760	26.471	-8.711
8.510	19.111	-10.601	19.250	17.123	2.127
9.600	18.294	-8.694	17.760	17.124	0.636
7.560	3.257	4.303	23.100	17.274	5.826
5.460	10.490	-5.030	10.750	11.781	-1.031
17.390	13.221	4.169	9.120	8.843	0.277
16.000	3.715	12.285	6.570	16.672	-10.102
12.320	10.791	1.529	11.860	19.549	-7.689
19.500	17.763	1.737	8.840	15.572	-6.732
16.230	32.267	-16.037	8.800	12.908	-4.108
15.120	15.529	-0.409	8.720	17.384	-8.664
12.160	12.601	-0.441	4.320	17.188	-12.868
10.370	17.271	-6.901	11.160	17.189	-6.029
7.000	20.830	-13.830	8.800	12.600	-3.800
11.190	13.428	-2.238	7.300	11.580	-4.280
13.300	18.876	-5.576	9.600	17.236	-7.636
9.560	16.958	-7.398	9.000	18.661	-9.661
12.580	17.375	-4.795	5.000	13.632	-8.632

10.620	3.566	7.054	5.600	9.835	-4.235
13.540	30.761	-17.221	10.200	20.974	-10.774
9.430	27.657	-18.227	8.040	18.478	-10.438
12.520	14.828	-2.308	6.900	6.638	0.262
13.890	15.663	-1.773	7.600	10.437	-2.837
12.260	14.500	-2.240			

Fuente: Elaboración Propia utilizando Win edit

Tabla N°15: Resultados del contenido de humedad para las muestras con redes neuronales artificiales y resultados de laboratorio

Muestras	C-1	C-2	C-3	C-4
Límite líquido	22.13	25.79	29.35	27.62
Límite plástico	13.99	13.96	18.89	18.53
Índice de plasticidad	8.15	11.84	10.46	9.1
% Grava	35.22	34.12	64.14	51.29
% Arena	46.61	50.24	23.42	41.38
% fina	18.17	15.64	12.44	7.33
AASTHO_N	22	22	22	20
SUCS_N	8	8	4	31
Contenido de humedad óptimo(%)	16.00	15.20	20.00	15.60
Cont. Hum. ópt. RNA(%)	12.77	13.35	17.25	13.77

Fuente: Elaboración Propia utilizando Win edit

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Las conclusiones la presente investigación es que las redes neuronales son herramientas potentes para predecir información en base a los datos alimentados mientras más datos alimentados mejor el aprendizaje de la red neuronal.

☞ Se utilizaron para cumplir los objetivos aproximadamente 500 datos entre los mejores para el entrenamiento, la validación y la prueba del modelo de Feed Forward Back propagation, donde el modelo para el objetivo principal predice entre el 70% a 80% los parámetros de compactación debido a que el aprendizaje de los modelos de redes neuronales artificiales evolucionan en función a la cantidad de datos ingresados a la red, donde la limitación para la presente investigación fueron la obtención de miles de datos para encontrar un modelo con mayor precisión que tienda al 100%, no por ello deja de ser una investigación poca precisa la características de los modelos de redes neuronales artificiales es evolucionar en función a la alimentación de los datos en el tiempo como ejemplo podemos citar la herramienta del CHAT GPT4, como se apreció en los primeros días de su aplicación las informaciones brindadas por este aplicativo eran poco preciso hasta retroalimentarse y a través del tiempo se fue perfeccionando en función a la alimentación de datos y hasta encontrar mayor precisión de igual manera la presente investigación proyecto que a mayor datos conseguidos a futuro se tendrán mejores resultados por lo que es recomendable mejorar esta investigación, además según Hernández Sampieri todas investigación tienen limitaciones no por ello dejan de ser investigadas.

☞ Para el objetivo específico N°01 se pudo cumplir análogamente al objetivo principal en un 70% a 80% ya que los objetivos específicos es el desagregado del objetivo principal, donde se pudo concluir que los límites de Atemberg como son el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad son parámetros de entrada a la red neuronal que tienen relación para la obtención de los parámetros de compactación como son la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptima donde se aprecia en la contrastación de hipótesis con la tabla ANOVA o tabla de varianzas que tiene una fuerte relación de sig y confiabilidad al 90% según t-Student donde modelo de contrastación por tabla ANOVA es la más utilizas para relacionar parámetros con regresiones y varianzas.

☞ Para el objetivo específico N°02 se pudo cumplir análogamente al objetivo principal en un 70% a 80% ya que los objetivos específicos es el desagregado del objetivo principal, es la clasificación de suelos según SUCS, ASSTHO, también son parámetros de entrada a la red neuronal que tienen relación para la obtención de los parámetros de compactación como son la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptima donde se aprecia en la contrastación de hipótesis con la tabla ANOVA o tabla de varianzas que tiene una fuerte relación de sig y confiabilidad al 90% según t-Student donde modelo de contrastación por tabla ANOVA es la más utilizada para relacionar parámetros con regresiones y varianzas

☞ Para el objetivo específico N°03 se pudo cumplir análogamente al objetivo principal en un 70% a 80% ya que los objetivos específicos es el desagregado del objetivo principal, como son los finos, las gravas y las arenas donde estos también son parámetros de entrada a la red neuronal que tienen relación para la obtención de los parámetros de compactación como son la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptima donde se aprecia en la contrastación de hipótesis con la tabla ANOVA o tabla de varianzas que tiene una fuerte relación de sig y confiabilidad al 90% según t-Student donde modelo de contrastación por tabla ANOVA es la más utilizada para relacionar parámetros con regresiones y varianzas

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Khafaji, A. N. (2015). Estimation of soil compaction parameters by means of Atterberg limits. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 26, 359-368.
- Altun, S., Göktepe, B. A. y Sezer, A. (2008). Investigation of Parameters of Compaction Testing. *Article in Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* · January 2008.
- Ardakani, A. y Kordnaeij, A. (2017). Soil compaction parameters prediction using GMDH-type neural network and genetic algorithm. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.
- Blotz, L. R., Benson, C. H. y Boutwel, G. P. (1990). ESTIMATING OPTIMUM WATER CONTENT AND MAXIMUM DRY UNIT WEIGHT FOR COMPACTED CLAYS. *ASCE*.
- Braja Das, M. (2019). *Advanced Soil Mechanics*.
- Daniel, D. E. y Benson, C. H. (1991). WATER CONTENT-DENSITY CRITERIA FOR COMPACTED SOIL LINERS. *ASCE*.
- Figueredo, M. K. y Milena, A. S. (2015). *SOFTWARE DE APOYO PARA EL PROCESO DE ENSEÑANZA – APRENDIZAJE EN REDES NEURONALES ARTIFICIALES EN LA UNIVERSIDAD LIBRE*.
- Franco y Michael. (2010). Redes Neuronales artificiales. *Springer Series in Optical Sciences*.
- Gestal, P. (2013). *Introducción a las redes de neuronas artificiales*, Universidad de La Coruña, España. <http://sabia.tic.udc.es/mgestal/cv/RNATutorial/TutorialRNA.pdf>
- Gohary, K. M. E., Aziz, R. F. y Khalek, H. A. (2017). Engineering Approach Using ANN to Improve and Predict Construction Labor Productivity under Different Influences. *sci hub*.
- Gunaydin, O. (2008). Estimation of soil compaction parameters by using statistical analyses and artificial neural networks. *Environ Geol* (2009) 57:203–215.
- Heravi, G. (2015). Applying Artificial Neural Networks for Measuring and Predicting Construction-Labor Productivity. *Archives Neerlandaises Sci Exactes et Naturelles*.

- Hryciw, R. D. y Jung, Y. (2010). Three-Point Imaging Test for AASHTO Soil Classification. *Journal of the Transportation Research Board, No. 2101, Transportation Research Board of the National Academies, Washington.*
- Kallas, A. A. B. N. (2004). Modeling soil collapse by artificial neural networks. *Geotechnical and Geological Engineering 2004 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.*
- Kumor, L. A., Kumor, M. K. y Kopka, M. (2017). Geotechnical parameters of soil, considering the effect of additional compaction of embankment. *ELSEVIER.*
- Lambe, T. W. y Whitman, R. V. (1969). *Soil Mechanics.*
- Llique, R. y Guerrero, A. (2015). Influencia de la humedad de compactación en el comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos. *Revista ciencia y tecnología de la universidad Nacional de Trujillo.*
- López, G. (2010). Ensayos de compactación en carreteras : Próctor normal y modificado. *Universidad politécnica de Valencia.*
- Mondragón, R. H. L. y Chávez, L. A. L. (2017). Influencia de la energía de compactación en la densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad de suelo granular. *CAXAMARCA.*
- Montaño, J. (2002). *Redes neuronales artificiales aplicadas al análisis de datos. Tesis Doc., Palma de Mallorca, España, Universidad de las Islas Baleares.*
- Murthy, V. N. S. (2002). *Principles and practices of soil Mechanics and Foundation Engineering.*
- Ören, A. H. (2014). Estimating compaction parameters of clayey soils from sediment volume test. *journal homepage: www.elsevier.com/locate/clay.*
- othman, K. (2023). Estimation of the compaction parameters of aggregate base course using artificial neural networks. *Research Article SN.*
- Polidori, E. (2015). Proposal for a New Classification of Common Inorganic Soils for Engineering Purposes. *Springer International Publishing Switzerland 2015.*
- Rao y Rao. (1996). C++ Neural Network and fuzzy logic, BPG ,New Delhi India 380-381. *SCI HUB.*

- Sampieri, R. H., Collado, C. F. y Lucio, P. B. (2014). *Metodología de la Investigación* (M. G.-H. / . Interamericana, Ed.; 6.^a ed.).
- Socha, D. y Ortiz, G. (2005). *Aplicación de redes neuronales MLP a la predicción de un paso en series de tiempo*. Fundación Universitaria Konrad Lorenz, Bogotá, pp. 183.
- Sridhanran, A. y Nagaraj, H. B. (2005). Plastic limit and compaction characteristics of fine- grained soils. *Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India; BMS College of Engineering, Bangalore, India*.
- Tachibana, S., Matsumoto, M. y Iizuka, A. (2020). Practical method to estimate parameters of elasto-plastic constitutive model for unsaturated soils from compaction curve. *ScienceDirect*.
- Taskiran, T. (2010). Prediction of California bearing ratio (CBR) of fine grained soils by AI methods. *Department of Civil Engineering, Dicle University Engineering and Architecture Faculty, 21280 Diyarbakir, Turkey*.
- Tatsuoka, F., Hashimoto, T. y Tateyama, K. (2021). Soil stiffness as a function of dry density and the degree of saturation for compaction control. *ScienceDirect*.
- Terzagui, K. (2001). *Theoretical Soil Mechanics*.
- Vázquez, J., Gisela, R., Verónica, R., Maximiliano, M. y Matilde, M. (2018). El uso del test de proctor para la reducción de la compactación del suelo. *SEDICI*.
- W., R. y Fellow. (2014). ESTIMATING OPTIMUM WATER CONTENT AND MAXIMUM DRY UNIT WEIGHT FOR COMPACTED CLAYS. *ASCE*.
- Yildirim, B. y Gunaydin, O. (2011). Estimation of California bearing ratio by using soft computing systems. *Contents lists available at ScienceDirect Expert Systems with Applications*.
- Zhang, G. y Patuwo, E. (1998). *Forecasting with artificial neural networks: The state of the art*. *International Journal of Forecasting* 14, 35-62.

“La vida no es sino una continua sucesión de oportunidades para sobrevivir”

— Gabriel García Márquez

Apéndice

A

ANEXO A

A.1 Imágenes de pruebas de laboratorio para próctor

Figura A.1: Ensayos de laboratorio de Proctor.



Nota: Ensayos de laboratorio de Proctor. **Fuente:** Elaboración propia

Figura A.2: Ensayos de laboratorio de Proctor.



Nota: Ensayos de laboratorio de Proctor. **Fuente:** Elaboración propia

Figura A.3: Ensayos de laboratorio de Proctor.



Nota: Ensayos de laboratorio de Proctor. **Fuente:** Elaboración propia

Figura A.4: Ensayos de laboratorio de Proctor.



Nota: Ensayos de laboratorio de Proctor. **Fuente:** Elaboración propia

Figura A.5: Ensayos de laboratorio de Proctor.



Nota: Ensayos de laboratorio de Proctor. **Fuente:** Elaboración propia

Figura A.6: Ensayos de laboratorio de Proctor.



Nota: Ensayos de laboratorio de Proctor. **Fuente:** Elaboración propia

**ACTA N°15-2024-FIMGC: ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS****PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal N° 176-2024-FIMGC-D**, a los veintinueve días del mes de febrero de 2024, siendo las 06:00 p.m, reunidos en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, bajo la presidencia del M.Sc. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS Decano de la FIMGC y los miembros; M.Sc. Hemerson LIZARBE ALARCON, Ing. Ángel Hugo VILCHEZ PEÑA, actuando como secretario docente el M.Sc. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO, para proceder a la sustentación de tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, del bachiller en Ciencias de la Ingeniería Civil:

JONATHAN JOEL ESCOBAR VENTURA

Quien presentó la tesis denominada:

“ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN Y RESISTENCIA DE SOPORTE EN SUELOS DE SUBRASANTE UTILIZANDO REDES NEURONALES ARTIFICIALES SUPERVISADAS EN LA PAVIMENTACIÓN DE LA AV. EJÉRCITO DE ANDRÉS AVELINO CÁCERES AYACUCHO, 2021”

Los señores miembros del jurado luego de expuesto la tesis y absueltas las preguntas, delibera y lo declaran:

APROBADO CON NOTA CATORCE (14)

Siendo las 8:10 p.m. del día 29 de febrero de 2024, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad a lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

MSc. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS
Presidente

M.Sc. Hemerson LIZARBE ALARCON
Miembro

M.Sc. Ángel Hugo VILCHEZ PEÑA
Miembro

M.Sc. kelvis BERROCAL ARGUMEDO
Secretario docente de la FIMGC

cc:
Archivo



UNSH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL



"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 010-2024-FIMGC/ASIH

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, de la Escuela Profesional de **Ingeniería Civil** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la **Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 476-2023-FIMGC-UNSH-D**, deja constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : ESCOBAR VENTURA, JONATHAN JOEL
Escuela Profesional : INGENIERÍA CIVIL
Título de la Tesis : ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN Y RESISTENCIA DE SOPORTE EN SUELOS DE SUBRASANTE UTILIZANDO REDES NEURONALES ARTIFICIALES SUPERVISADAS EN LA PAVIMENTACIÓN DE LA AV. EJÉRCITO DE ANDRÉS AVELINO CÁCERES AYACUCHO, 2021
Evaluación de la Originalidad : 17 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 2296310516

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 16 de febrero del 2024



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

Msc. Ing. Alex Sander IRCANAUPA HUAMANI
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado
Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN Y RESISTENCIA DE SOPORTE EN SUELOS DE SUBRASANTE UTILIZANDO REDES NEURONALES ARTIFICIALES SUPERVISADAS EN LA PAVIMENTACIÓN DE LA AV. EJÉRCITO DE ANDRÉS AVELINO CÁCERES AYACUCHO, 2021

por Jonathan Joel Escobar Ventura

Fecha de entrega: 16-feb-2024 06:31a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2296310516

Nombre del archivo: BORRADOR_JONATHAN_JOEL_EV.pdf (4.36M)

Total de palabras: 37646

Total de caracteres: 144979

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN Y RESISTENCIA DE SOPORTE EN SUELOS DE SUBRASANTE UTILIZANDO REDES NEURONALES ARTIFICIALES SUPERVISADAS EN LA PAVIMENTACIÓN DE LA AV. EJÉRCITO DE ANDRÉS AVELINO CÁCERES AYACUCHO, 2021

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%	12%	4%	12%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	8%
2	qdoc.tips Fuente de Internet	1%
3	Submitted to CONACYT Trabajo del estudiante	1%
4	sedici.unlp.edu.ar Fuente de Internet	1%
5	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
6	repositorio.uta.edu.ec Fuente de Internet	<1%
7	repository.udem.edu.co Fuente de Internet	<1%

8	doku.pub Fuente de Internet	<1 %
9	www.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
10	Submitted to Universidad del Bio-Bio Trabajo del estudiante	<1 %
11	Submitted to Universidad Andina del Cusco Trabajo del estudiante	<1 %
12	repositorio.puce.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
13	repositorio.uandina.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
14	Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru Trabajo del estudiante	<1 %
15	revistas.ustabuca.edu.co Fuente de Internet	<1 %
16	documents.tips Fuente de Internet	<1 %
17	doczz.es Fuente de Internet	<1 %
18	repositorio.uap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

19	Submitted to Universidad Nacional de Colombia Trabajo del estudiante	<1 %
20	documents.mx Fuente de Internet	<1 %
21	documentop.com Fuente de Internet	<1 %
22	Submitted to Universidad Santo Tomas Trabajo del estudiante	<1 %
23	www.revistas.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
24	pt.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
25	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
26	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
27	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
28	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
29	Submitted to Universidad Carlos III de Madrid Trabajo del estudiante	<1 %
30	repositorio.unesum.edu.ec	

Fuente de Internet

<1 %

31

www.geokniga.org

Fuente de Internet

<1 %

32

www.repositorio.usac.edu.gt

Fuente de Internet

<1 %

33

repositorio.unc.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

34

Submitted to Universidad San Francisco de Quito

Trabajo del estudiante

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo