

UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

“RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL TERRENO Y
CARACTERIZACIÓN DEL SUELO DE FUNDACIÓN DE LA
INSTITUCIÓN EDUCATIVA N° 60778, DISTRITO DE SAN
JUAN BAUTISTA, PROVINCIA DE MAYNAS, PERÚ 2022”.

Autores: Bach. Baca Ibaran, Carlos

Bach. Wong Aspajo, Jhosept Nikita

Asesor: Ing. Ulises Octavio Irigoin Cabrera

Co Asesor: Ing. Claudia de Jesús Morales Aquituari

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Ulises Irigoin', written over a horizontal line.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Claudia Morales', written in a cursive style.

Requisito para optar el título profesional de Ingeniero Civil

IQUITOS – PERÚ

2022

DEDICATORIA

A Dios por la vida, la salud y las oportunidades que día a día se nos presenta para ser mejores seres humanos.

Con mucho cariño a nuestros padres Edna Ibaran, Melita Aspajo, Carlos Baca, Nikita Wong, y hermanos, por su amor, apoyo y confianza que nos brindan en cada momento de nuestras vidas personales y profesionales, y por brindarnos sus apoyo, dedicación y paciencia durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Científica del Perú, por habernos brindado la oportunidad de formarnos académicamente con docentes de calidad y por darnos el aporte a nuestro desarrollo profesional, a los docentes por motivarnos a superarnos en cada paso de la carrera profesional.

Al Asesor Ing. Ulises Octavio Irigoín Cabrera y al Co Asesora Ing. Claudia de Jesús Morales Aquituari por sus disponibilidad, dedicación y apoyo durante el desarrollo de esta investigación, por brindarnos en todo momento la motivación necesaria para poder alcanzar la meta y por transmitirnos sus experiencias académicas y profesionales.

A los docentes que nos enseñaron en cada ciclo académico los cuales se encargaron de ampliar y pulir nuestros conocimientos con la finalidad de alcanzar nuestros objetivos.

A todas las personas que de forma indirecta nos dieron el apoyo para la realización de esta tesis y sobre todo por el apoyo moral y confianza que siempre depositaron en nosotros.

A Dios por permitirnos vivir esta ardua, sacrificada pero finalmente bonita e inolvidable experiencia.

CBI - JNWA

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP

El presidente del Comité de Ética de la Universidad Científica del Perú - UCP

Hace constar que:

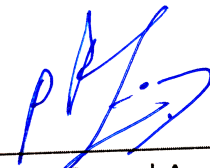
La Tesis titulada:

“RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL TERRENO Y CARACTERIZACIÓN DEL SUELO DE FUNDACIÓN DE LA INSTITUCIÓN EDUCATIVA N° 60778, DISTRITO DE SAN JUAN BAUTISTA, PROVINCIA DE MAYNAS, PERÚ 2022”

De los alumnos: **BACA IBARAN CARLOS Y WONG ASPAJO JHOSEPT NIKITA**, de la Facultad de Ciencias e Ingeniería, pasó satisfactoriamente la revisión por el Software Antiplagio, con un porcentaje de **10% de plagio**.

Se expide la presente, a solicitud de la parte interesada para los fines que estime conveniente.

San Juan, 10 de Octubre del 2022.















Dr. César J. Ramal Asayag
Presidente del Comité de Ética – UCP

Document Information

Analyzed document	UCP_IngenieriaCivil_2022_TESIS_CarlosBaca_JhoseptWong_V1.pdf (D145048913)
Submitted	2022-09-28 16:32:00
Submitted by	Comisión Antiplagio
Submitter email	revision.antiplagio@ucp.edu.pe
Similarity	10%
Analysis address	revision.antiplagio.ucp@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	TESIS JHIMY ALBA -Corregida.docx Document TESIS JHIMY ALBA -Corregida.docx (D13093339)		2
SA	Titulación GC.pdf Document Titulación GC.pdf (D13372935)		1
SA	Briones Alva, María Emérita Irigoín Gonzales, Nelson Ulices.pdf Document Briones Alva, María Emérita Irigoín Gonzales, Nelson Ulices.pdf (D140263809)		30
SA	PROYECTO INVEST_TESIS_Mayo...ultimo de ultimo.docx Document PROYECTO INVEST_TESIS_Mayo...ultimo de ultimo.docx (D39039468)		1
SA	TESIS PROFESIONAL -HERRERA FIGUEROA EDGAR OMAR.pdf Document TESIS PROFESIONAL -HERRERA FIGUEROA EDGAR OMAR.pdf (D112577376)		1
SA	proyecto JENNIFER MARCILLO 1.docx Document proyecto JENNIFER MARCILLO 1.docx (D30110696)		1
SA	EF_TALLER DE TESIS 2_AMAYA CHARCAPE SANDRO JAREF Y CALDERON RAMIREZ CRISTHIAN ENRIQUE.docx Document EF_TALLER DE TESIS 2_AMAYA CHARCAPE SANDRO JAREF Y CALDERON RAMIREZ CRISTHIAN ENRIQUE.docx (D141551595)		2
SA	TESIS CAPACIDAD ADMISIBLE-MORI (1).docx Document TESIS CAPACIDAD ADMISIBLE-MORI (1).docx (D141778298)		1
SA	1427341002_Tesis Ulloa, Vargas.pdf Document 1427341002_Tesis Ulloa, Vargas.pdf (D13734582)		6
SA	Tesis Claudel Guerrero.pdf Document Tesis Claudel Guerrero.pdf (D13281553)		1
W	URL: https://www.researchgate.net/publication/271074412_MANUAL_PARA_LA_MEDICION_DE_RESISTIVIDAD_DEL_SUELO Fetched: 2019-11-01 07:11:43		2
SA	ERICKA_PUJUPAT.pdf Document ERICKA_PUJUPAT.pdf (D129806672)		1

Entire Document

1 UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL TESIS RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL TERRENO Y CARACTERIZACIÓN DEL SUELO DE FUNDACIÓN DE LA INSTITUCIÓN EDUCATIVA N° 60778, DISTRITO DE SAN JUAN BAUTISTA, PROVINCIA DE MAYNAS, PERÚ 2022". Autores: Baca Ibaran, Carlos Wong Aspajo Jhosept, Nikita Asesor: Ing. Ulises Octavio Irigoín Cabrera Co Asesor: Ing. Claudia de Jesús Morales Aquituari Requisito para optar el título profesional de Ingeniero Civil IQUITOS – PERÚ 2022

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

**FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA**

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Con Resolución Decanal **Nº300-2022-UCP-FCEI** de fecha 21 de Marzo de 2022, La FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL PERÚ - UCP designa como Jurado Evaluador de la sustentación de tesis a los señores:

- | | |
|-------------------------------------------|------------|
| • Ing. Carol Begoña García Langer, M.Sc. | Presidente |
| • Ing. Juan Jesús Ocaña Aponte, M.Sc. | Miembro |
| • Ing. Jefree Stefano Arévalo Flores, Mg. | Miembro |

Como Asesor: **Ing. Ulises Octavio Irigoin Cabrera, M. Sc.**

Como Co Asesora: **Ing. Claudia de Jesús Morales Aquituari, M. Sc.**

En la ciudad de Iquitos, siendo las 10:00 horas del día 23 de noviembre del 2022, a través de la plataforma ZOOM supervisado en línea por el secretario académico del programa académico de Ingeniería civil de la facultad de Ciencias e Ingeniería de la Universidad Científica del Perú, se constituyó el Jurado para escuchar la sustentación y defensa de la Tesis: **“RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL TERRENO Y CARACTERIZACIÓN DEL SUELO DE FUNDACIÓN DE LA INSTITUCIÓN EDUCATIVA Nº 60778, DISTRITO DE SAN JUAN BAUTISTA, PROVINCIA DE MAYNAS, PERÚ 2022”**.

Presentado por los sustentantes:

**CARLOS BACA IBARAN Y
JHOSEPT NIKITA WONG ASPAJO**

Como requisito para optar el título profesional de: **INGENIERO CIVIL**

Luego de escuchar la sustentación y formuladas las preguntas las que fueron: **ABSUELTAS**.

El Jurado después de la deliberación en privado llegó a la siguiente conclusión:

La sustentación es: **APROBADA POR MAYORIA**

En fe de lo cual los miembros del Jurado firman el acta.



Presidente



Miembro



JEFREE S. ARÉVALO FLORES
INGENIERO CIVIL
CIP. Nº 143914

Miembro

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS	3
ÍNDICE DE CONTENIDO	7
ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE FIGURAS	10
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
1. MARCO TEÓRICO	13
1.1. Antecedentes del estudio	13
1.1.1. Antecedentes generales	13
1.1.2. Antecedentes específicos del estudio	18
1.2. BASES TEÓRICAS	23
1.2.1. Resistividad eléctrica del terreno	23
1.2.2. Resistividad de terreno según material natural constituyente	26
1.2.3. Resistividad aparente	27
1.2.4. Factores que afectan la resistividad del terreno	28
1.2.5. Valores típicos de resistividad del terreno	36
1.2.6. Potencial eléctrico en un espacio homogéneo producido por una corriente	37
1.2.7. Tipos de prospecciones para medición de resistividad del terreno por una corriente	39
1.2.8. Métodos de medición de la resistividad del suelo	45
1.2.9. Normatividad aplicada a la medición de la resistividad del suelo	50
1.2.10. Suelos	50
1.2.11. Propiedades físicas y clasificación de los suelos	55
1.2.12. Propiedades físicas y químicas de las arcillas	66
1.2.13. Propiedades de los suelos granulares	66
1.2.14. Propiedades de los suelos residuales	68
1.2.15. Análisis de la materia orgánica	69
1.2.16. Exploración geotécnica	70
1.2.17. Criterios para calificación de suelos con fines urbanos	72
1.2.18. El suelo como elemento estructural de soporte de estructuras	74
1.2.19. Cimentaciones	75
1.3. Definición de términos básicos	79
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	80
2.1. Descripción del problema	80
2.2. Formulación del problema	81
2.2.1. Problema general	81

2.2.2. Problemas específicos	82
2.1.3. Objetivos	82
2.1.3.1. Objetivo general	82
2.1.3.2. Objetivos específicos.....	83
2.1.4. Hipótesis	83
2.1.4.1. Hipótesis general.....	83
2.1.4.2. Hipótesis específicas	83
2.2. Variables	84
2.2.3. Identificación de variables	84
2.2.4. Definición conceptual y operacional de variables	85
2.2.4.1. Definición conceptual de variables.....	85
2.2.4.2. Definición operacional de variables	85
3. METODOLOGÍA.....	86
3.1. Tipo y diseño de la investigación	86
3.1.1. Tipo de investigación	86
3.1.2. Diseño de la investigación.....	87
3.2. Población y muestra.....	87
3.2.1. Población	87
3.2.2. Muestra.....	87
3.3. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos	88
3.3.1. Técnicas	88
3.3.2. Instrumentos.....	88
3.3.3. Procedimientos de recolección de datos.....	89
3.4. Procesamiento para el análisis de datos	91
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	95
4.1. Coordenadas y resistividad.....	95
4.1.1. Clasificación del suelo según SUCS y AASHTO.....	96
4.1.2. Clasificación de suelo según parámetros de Resistividad Eléctrica.....	98
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	101
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
6.1. Conclusiones	103
6.2. Recomendaciones	105
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
ANEXOS.....	111
ANEXO 1: Resistividad de suelos, método Wenner 4 barras.	111
ANEXO 3: Matriz de consistencia.....	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cuadro de resultados de tipos de suelos por estratos en calicatas ...	20
Tabla 2. Cuadro de resultados de tipos de suelos por estratos en calicatas ...	22
Tabla 3. Valores de Resistividad en terrenos	26
Tabla 4. Resistividades medias en terrenos típicos.....	27
Tabla 5. Resistividades de distintos tipos de agua	34
Tabla 6. Resistividad del suelo según su antigüedad.....	36
Tabla 7. Resistividad por constitución del suelo	36
Tabla 8. Denominaciones de la compacidad (Das, 2001)	56
Tabla 9. Clasificación de los suelos en cuatro grandes grupos en función de su granulometría.....	64
Tabla 10. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos.....	65
Tabla 11. Niveles de Materia Orgánica	70
Tabla 12. Tipo de edificación para investigación de suelos	71
Tabla 13. Número de puntos de investigación de suelo	71
Tabla 14. Criterios para identificar suelos aptos para construcción.....	73
Tabla 15. Relación de resistividad con características del suelo	79
Tabla 16. Operacionalización de Variables	85
Tabla 17. Tipo de investigación.....	86
Tabla 18. Cuadro de coordenadas UTM, Sistema WGS-84 Zona 18L	95
Tabla 19. Resistividad aparente para cada separación de electrodos	95
Tabla 20. Calicata C-1. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia	96
Tabla 21. Calicata C-1. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia	97
Tabla 22. Calicata C-2. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia	97
Tabla 23. Calicata C-2. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Resistividad de un cubo de determinado terreno de 1m de arista.	24
Figura 2. Representación de un suelo estratificado.....	28
Figura 3. Variación de la resistividad en función de la humedad y dos temperaturas distintas según Albrecht.	29
Figura 4. Resistividad relativa, según la variación de temperatura del terreno.	31
Figura 5. Variación de la resistividad con la compacidad del terreno.	32
Figura 6. Influencia de la estratificación del terreno con dos capas en la resistividad.....	35
Figura 7. Líneas de campo eléctrico y superficies equipotenciales	38
Figura 8. Ley de Ohm aplicado a la superficie de un suelo	39
Figura 9. Resistividad aparente vs profundidad.....	41
Figura 10. Aplicación correcta e incorrecta del método de Wenner.....	42
Figura 11. Variaciones laterales típicas en un terreno.....	42
Figura 12. Calicata eléctrica usando la configuración de Wenner.	44
Figura 13. Configuración de Wenner.....	47
Figura 14. Configuración de Schlumberger.	49
Figura 15. Curva granulométrica de un suelo (Según Lambe, 1951).....	60
Figura 16. Curvas granulométricas	60
Figura 17. Profundidad de desplante.	77

RESUMEN

En esta investigación descriptiva, se propone contribuir al conocimiento sobre el tema de caracterización de suelos con fines de cimentación de edificaciones en un terreno ubicado en la selva peruana de propiedad de la Institución Educativa N° 60778.

Se obtiene resultados aplicando el método de Wenner y el estudio convencional de la Mecánica de Suelos, encontrándose que la evaluación del corte geológico y características del suelo determinados por medición de resistividad eléctrica es concordante con el perfil estratigráfico y tipo de suelos encontrados por los estudios de la Mecánica de Suelos; asimismo, es 20 veces más eficiente en tiempo y costo que el método convencional.

Palabras Clave: Resistividad eléctrica; perfil geológico, propiedades físicas de suelos.

ABSTRACT

In this descriptive research, it is proposed to contribute to the knowledge on the subject of soil characterization for the purpose of building foundations on land located in the Peruvian jungle owned by the educational institution 60778 in Iquitos.

Results are obtained by applying the Wenner method and the conventional study of Soil Mechanics, finding that the evaluation of the geological section and soil characteristics determined by electrical resistivity measurement is 20 times more efficient in time and cost than the conventional method.

Palabras Clave: Electrical resistivity; geological profile, physical properties of soils.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes del estudio

1.1.1. Antecedentes generales

(Lavalle, 2021), en su trabajo de Tesis “Estudio comparativo de métodos de medición de la resistividad del terreno y propuesta de protocolo de medición”, llegó, entre otras, a las siguientes conclusiones:

“La resistividad eléctrica del terreno es un parámetro que varía con una gran cantidad de factores como la concentración de sales, humedad, temperatura, compactación, tipo de sustancias presentes y en general de la composición del terreno. Esta amplia gama de factores que la alteran hace posible que sus valores se puedan usar para identificar la estructura presente en el suelo y así determinar el tipo de mineral del que está compuesto. Posee gran cantidad de aplicaciones no solamente en el desarrollo y proyectos de sistemas de puesta a tierra, sino que también es una propiedad clave en la exploración minera, petrolera y masas de agua subterráneas. Actualmente su uso se ha expandido incluso en determinar la eficiencia del riego tecnificado en cuanto a la retención de humedad se refiere” (Lavalle, 2021).

“Cada fabricante de un equipo posee una serie de recomendaciones que no deben de pasar de irrelevantes al momento de realizar las mediciones. Cada uno de ellos, posee una configuración y modo de operación diferente, inclusive entre modelos distintos del mismo fabricante. Algunos entregan el valor de resistividad directamente (habiendo colocado previamente la distancia entre electrodos), más otros entregan solo el valor de resistencia, por lo que posterior a la medición, se precisa de un pre análisis para aplicar una fórmula matemática, acorde con la configuración que el fabricante emplee en su manual de usuario, para luego de ello encontrar la resistividad” (Lavalle, 2021).

“Los métodos tanto para medir la resistividad como para su posterior interpretación son muy variados en su forma. Elegir el adecuado y entender sus alcances y limitaciones es necesario para una buena aproximación. Si algo es seguro, el desarrollo del método de interpretación por curvas patrón, revolucionó el análisis de como ver la estructura equivalente del terreno, en cuanto a estratos y constitución de este se refiere. Lo novedoso de ello fue crear a partir de métodos matemáticos, curvas adimensionales que aproximaran de buena manera el terreno. El desarrollo de los computadores no redujo el uso de las curvas patrón, sino que lo ponderó” (Lavalle, 2021).

“Durante el ejercicio de campo, se dio cuenta de cuán importante es la práctica en un ingeniero como complemento del entendimiento de los principios físicos, uno no reemplaza al otro y esto lleva a la importancia de vivir con un buen balance teórico práctico. En la experiencia vivida en campo realizando las mediciones, se aprenden y refuerzan los conocimientos obtenidos en el aula. Además, se lleva a la conclusión de que en cuanto al conocimiento se refiere, no sirve de nada el acumularlo si no se comparte con los demás” (Lavalle, 2021).

(Quispilaya y Cruz, 2018), en su trabajo de tesis “Propuesta de método no convencional Wenner de resistividad eléctrica para caracterización de suelos en institución educativa Libertador San Martín – Recuay 2018”, analizó las características del suelo en dicha institución, a través de un Telurímetro Megabras Digital MTD – 20KWe; y, llegó a las siguientes conclusiones:

El método Wenner de resistividad eléctrica ha resultado ser un buen método para obtener el corte geoelectrico y geológico del suelo sin necesidad de realizar excavaciones, esto contribuye a determinar la capa de suelo competente para la cimentación de una edificación, siendo este dato muy importante para la futura construcción (Quispilaya y Cruz, 2018).

En los suelos de la Institución educativa Libertador San Martín existe una correlación satisfactoria entre el método Wenner de resistividad eléctrica y el método convencional de análisis de suelos, debido a que se obtuvieron resultados semejantes en cuanto a estratigrafía (9% de error), clasificación de suelos y profundidad de desplante (Quispilaya y Cruz, 2018).

Los tiempos y costos asociados al método Wenner de resistividad eléctrica en comparación con el método convencional, son favorables en una relación de 7:1 y de 2:1 respectivamente (Quispilaya y Cruz, 2018).

Jiménez (2008) en la tesis para optar el Título de Ingeniero de Minas titulada “Elaboración de un plan de explotación de aguas subterráneas en una zona de la península de Santa Elena, mediante la interpretación de métodos resistivos” realizada en la Escuela Superior Politécnica del Litoral facultad de ciencias de la tierra – Ecuador tuvo como objetivo desarrollar una red de sondeos eléctricos verticales en la zona de Salinas, Zapotal, Chanduy y Santo Tomás; así también, elaborar mapas de resistividad para la caracterización geoelectrica de los acuíferos subterráneos. Mediante la interpretación de valores de resistividad se logró identificar mejores áreas para la construcción de nuevos pozos, además se planteó un plan de explotación racional del recurso para satisfacer la demanda de agua en los sectores de interés. El marco teórico forma parte del aporte para la presente investigación. (Quispilaya y Cruz, 2018)

García y Otros (2011) en la tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, titulada “Aplicación de la prospección geofísica utilizando el método Schlumberger para exploración de agua subterránea en cantón Los Magueyes, colonia Santa Lucía, municipio de Ahuachapán” realizada en Universidad de El Salvador escuela de Ingeniería Civil facultad de ingeniería y arquitectura tuvieron como objetivo aplicar el método Schlumberger para determinar las características resistivas de los diferentes estratos y determinar la profundidad a la que se encuentra el posible acuífero, en este trabajo de graduación establecieron el

procedimiento a seguir para la identificación de posibles mantos de agua subterránea utilizando el método Schlumberger y que estos a su vez puedan ser utilizados por ingenieros civiles en el estudio de acuíferos subterráneos en una zona determinada; se logró determinar también la posible litología de la zona. El marco teórico forma parte del aporte para la presente investigación. (Quispilaya y Cruz, 2018)

Arias (2011) en la tesis para optar el Grado de Maestría en Ingeniería Geotecnia, titulada “Exploración Geotécnica – Relaciones Geo eléctricas” realizada en Universidad Nacional de Colombia facultad de minas Escuela de Ingeniería Civil tuvo como objetivo proponer una metodología de investigación geotécnica en suelos de la zona central de Antioquia que incluya y se beneficie de los métodos geo eléctricos de investigación del subsuelo, se ha demostrado que mediante la prospección geo eléctrica y a través del registro de resistividad real, se puede relacionar la calidad geo mecánica de los materiales para diferentes proyectos de ingeniería. El marco teórico y desarrollo de objetivos forman parte del aporte para la presente investigación. (Quispilaya y Cruz, 2018)

Toledo (2015) en la tesis para optar el Título de licenciado en Física, titulada “Aplicación de métodos geoeléctricos en la prospección geofísica” realizada en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos facultad de ciencias físicas tuvo como objetivo determinar la profundidad a la que se encuentra el posible acuífero a través de las características resistivas de los diferentes estratos que se encuentran sobre este; llegando a la conclusión de que en tomografía eléctrica se determinó el nivel del acuífero y suelo altamente conductivo a través de valores de resistividad, así mismo se determinó que la humedad relativa y la temperatura altera la resistividad de los suelos en una prospección geofísica. El marco metodológico forma parte del aporte para la presente investigación. (Quispilaya y Cruz, 2018)

Huisa (2017) en la tesis para optar el Título de Ingeniero Geofísico, titulada “Aplicación de los métodos de Resistividad Multielectrodo – Georadar y su modelización 2D para caracterizar el Subsuelo en la ampliación del terminal portuario general San Martín Región Ica” realizada

en Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa facultad de geología, geofísica y minas Escuela profesional de ingeniería Geofísica tuvo como objetivo presentar el método de resistividad Multielectrodo y Georadar para la caracterización del subsuelo en investigaciones geotécnicas en la Ampliación del Terminal Portuario General San Martín Región Ica, obteniendo como resultado que en correlación a ensayos in-situ para este estudio, se ha demostrado la credibilidad del procedimiento de trabajo de campo realizándose un control de calidad de datos de adquisición en campo, procesamiento e interpretación adecuado para proyectos con finalidades de ampliación portuaria en zonas marítimas. El marco teórico forma parte del aporte para la presente investigación (Quispilaya y Cruz, 2018).

Para **Ramírez (2017)** en la tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, titulada “Evaluación por métodos no convencionales de caracterización de suelos del distrito de morales, provincia de San Martín - región de San Martín” realizada en Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura tuvo como objetivo analizar las propiedades físicas de diferentes tipos de suelos delimitada dentro de la localidad de Morales, en el perímetro de los jirones: Jr. Oxapampa, Jr. José Gálvez, Jr. Callao, Psje. Las Flores, mediante el empleo de métodos de resistividad eléctrica, en el distrito de Morales – provincia de San Martín – región San Martín, llegando a la conclusión que mediante prospección geoeléctrica y a través del registro de resistividad real, se puede relacionar la calidad geomecánica de los materiales para diferentes proyectos de ingeniería; pues existe una alta correlación estadísticamente significativa entre los resultados del método tradicional con el método no convencional. $r = 0,875$ (Quispilaya y Cruz, 2018).

1.1.2. Antecedentes específicos del estudio

A. Estudio de Mecánica de Suelos con fines de Cimentación del Proyecto “Mejoramiento de los servicios educativos en la I.E.P.S. M. N° 60778, Comunidad de Nina Rumi, distrito de San Juan Bautista, Maynas – Loreto”, elaborado para la Municipalidad distrital de San Juan Bautista, año 2018 por: Ingeniería y Consultor Herrera.

El estudio contiene entre otros, los siguientes aspectos:

Exploración del sitio, muestreo y registro de exploración.

Descripción y generalización de los perfiles estratigráficos y profundidad de la napa freática.

Análisis de la cimentación: Profundidad de cimentación. Tipo de cimentación. Análisis de la capacidad admisible de carga. Análisis de asentamientos probables que ocurrirán en el terreno.

En el estudio se usó la perforación manual: ASTM D 1452 y el Ensayo de Penetración Dinámica Ligera (DPL): ASTM D 3441. En la investigación el consultor describe haber efectuado cinco (5) calicatas distribuidas en los pabellones de aulas; y, que la penetración se llevó a cabo cada 0.10m en tramos de 1.00m hasta llegar a la profundidad de tres (3.00m). La primera capa de 0.00m a 0.20m es suelo orgánico clasificado como Ts.

A continuación, se describen los suelos por estratos de las cinco calicatas:

Calicata N° 01

Los primeros 0.20m se eliminó. El primer estrato de 0.20m a 0.50m de profundidad, conformado por material orgánico con presencia de raíces en la capa más superficial, correspondiendo a un material limo arcilloso de mediana plasticidad, de color marrón oscuro, de consistencia blanda, con contenido de humedad natural de 28.70% y cuyo 88.80% de material es muy fino y pasa la malla 200.

El segundo estrato de 0.50m a 3.00m conformado por arcilla limosa de baja plasticidad, de color anaranjado, de consistencia media, con contenido de humedad natural de 14.50% y cuyo 67.90% de material es muy fino y pasa la malla 200.

Calicata N° 02

Los primeros 0.10m se eliminó. El primer estrato de 0.10m a 0.50m de profundidad, conformado por material orgánico con presencia de raíces en la capa más superficial, correspondiendo a un material limo arcilloso de mediana plasticidad, de color marrón oscuro, de consistencia blanda, con contenido de humedad natural de 19.30% y cuyo 95.40% de material es muy fino y pasa la malla 200.

El segundo estrato de 0.50m a 3.00m conformado por material arcilloso limoso arenoso de baja plasticidad, de color anaranjado, de consistencia blanda a media, con contenido de humedad natural de 15.70% y cuyo 54.10% de material es muy fino y pasa la malla 200.

Calicata N° 03

Los primeros 0.20m se eliminó. El primer estrato de 0.20m a 0.60m de profundidad, conformado por material orgánico con presencia de raíces en la capa más superficial, correspondiendo a un material limo arcilloso de mediana plasticidad, de color marrón, de consistencia muy blanda a media, con contenido de humedad natural de 16.80% y cuyo 94.10% de material es muy fino y pasa la malla 200.

El segundo estrato de 0.60m a 3.00m conformado por material arcilloso limoso arenoso de baja plasticidad, de color anaranjado, de consistencia media a compacta, con contenido de humedad natural de 16.10% y cuyo 61.80% de material es muy fino y pasa la malla 200.

Calicata N° 04

Los primeros 0.10m se eliminó. El primer estrato de 0.10m a 0.60m de profundidad, conformado por material orgánico con presencia de raíces en la capa más superficial, correspondiendo a un material limo arcilloso de baja plasticidad, de color marrón, de consistencia media, con

contenido de humedad natural de 22.50% y cuyo 71.90% de material es muy fino y pasa la malla 200.

El segundo estrato de 0.60m a 3.00m conformado por material arcilloso limoso de mediana plasticidad, de color anaranjado con trazas de óxido de fierro, de consistencia blanda a media, con contenido de humedad natural de 24.40% y cuyo 74.50% de material es muy fino y pasa la malla 200.

Calicata N° 05

Los primeros 0.20m se eliminó. El primer estrato de 0.20m a 0.70m de profundidad, conformado por material orgánico con presencia de raíces en la capa más superficial, correspondiendo a un material arcilla limosa arenosa de baja plasticidad, de color anaranjado, de consistencia blanda a media, con contenido de humedad natural de 18.70% y cuyo 64.40% de material es muy fino y pasa la malla 200.

El segundo estrato de 0.70m a 1.50m conformado por material arcilla inorgánica de alta plasticidad, de color anaranjado, de consistencia media, con contenido de humedad natural de 23.30% y cuyo 85.60% de material es muy fino y pasa la malla 200.

Tabla 1. Cuadro de resultados de tipos de suelos por estratos en calicatas

Calicata	Muestra	Prof. [m]	Humedad [%]	Pasa Malla 200	Límites de Atterberg			SUCS	AASHTO
					LL	LP	IP		
C-1	M-1	0.20-0.50	28.70	88.80	41.60	32.61	8.99	ML	A-5(9)
	M-2	0.50-3.00	14.50	67.90	27.00	22.09	5.91	CL-ML	A-4(6)
C-2	M-1	0.10-0.50	19.30	95.40	44.00	34.53	9.47	ML	A-5(9)
	M-2	0.50-3.00	15.70	54.10	27.50	21.58	5.92	CL-ML	A-4(3)
C-3	M-1	0.20-0.60	16.80	94.10	46.00	38.30	7.70	ML	A-5(10)
	M-2	0.60-3.00	16.10	61.80	26.55	21.47	5.08	CL-ML	A-4(5)
C-4	M-1	0.10-0.60	22.50	71.90	35.00	26.96	8.04	ML	A-4(7)
	M-2	0.60-3.00	24.40	74.50	38.70	24.59	14.11	CL	A-6(9)
C-5	M-1	0.20-0.70	18.70	64.40	28.30	21.46	6.84	CL-ML	A-4(5)
	M-2	0.70-3.00	23.30	85.60	57.00	28.39	28.61	CH	A-7-7(19)

Fuente: Municipalidad distrital de San Juan Bautista, mayo 2018. Estudio de Mecánica de Suelos con fines de Cimentación I.E.P.S.M. N° 60778, Nina Rumi

B. Estudio de Mecánica de Suelos con fines de Cimentación del Proyecto “Mejoramiento de los servicios educativos en la I.E.P.S. M. N° 60778, Comunidad de Nina Rumi, distrito de San Juan Bautista, Maynas – Loreto”, elaborado para el constructor “Consortio Nina Rumi” a solicitud de la Municipalidad distrital de San Juan Bautista, noviembre 2020 por “Geo – Concret”.

Las investigaciones de campo se efectuaron a través de prospecciones de estudio a tajo abierto (calicatas). Las profundidades máximas alcanzadas fueron contadas a partir de la superficie del terreno natural, se registró los espesores de cada uno de las capas, características de gradación, el estado de compacidad de cada uno de los materiales. De cada estrato se tomaron muestras disturbadas representativas, las que fueron descritas e identificadas mediante una tarjeta con la ubicación, número de muestra y profundidad, detallando el perfil estratigráfico de cada calicata.

El estudio contiene entre otros, los siguientes aspectos: En la investigación el consultor describe haber efectuado tres (3) calicatas de 1.00m x 1.00m con una profundidad de tres (3m), distribuidas en los pabellones de aulas. En laboratorio se efectuó los ensayos que conllevaron a la clasificación de suelos de los materiales de los estratos encontrados, a través de los sistemas SUCS y AASHTO. Asimismo, contiene, ensayos in-situ utilizando Auscultación dinámica ligera (DIN 4094 – P.E. ASTM D 399) para determinar en forma rápida la capacidad de carga del suelo. Análisis de la cimentación: Profundidad de cimentación. Tipo de cimentación. Capacidad admisible de carga. Nivel freático y cota 00 de las exploraciones. Asentamientos teóricos probables.

A continuación, se describen los suelos por estratos de las tres calicatas:

Calicata N° 01

Primer estrato de 0.00m a 0.40m de profundidad, conformado por material orgánico con presencia de raíces; así también un segundo estrato de 0.40m a 3.00m conformado por arcilla limosa de mediana plasticidad, color beige clasificada como (CL) A-7-6 (12).

Calicata N° 02

Primer estrato de 0.00m a 0.40m de profundidad, conformado por material orgánico con presencia de raíces; así también, un segundo estrato de 0.40m a 3.00m conformado por arcilla limosa de mediana plasticidad, color beige clasificada como (CL) A-7-6 (13).

Calicata N° 03

Primer estrato de 0.00m a 0.40m de profundidad, conformado por material orgánico con presencia de raíces; así también, un segundo estrato de 0.40m a 3.00m conformado por arcilla limosa de mediana plasticidad, color beige clasificada como (CL) A-7-6 (16).

Tabla 2. Cuadro de resultados de tipos de suelos por estratos en calicatas

Calicata	Muestra	Prof. [m]	Humedad [%]	Pasa Malla 200	Límites de Atterberg %			SUCS	AASHTO
					LL	LP	IP		
C-1	M-1	0.00-0.40						Turba orgánica	
	M-2	0.40-3.00	32.00	91.22	44.10	16.80	27.30	CL	A-7-6(12)
C-2	M-1	0.00-0.40						Turba orgánica	
	M-2	0.40-3.00	21.80	95.89	43.20	20.40	22.90	CL	A-7-6(13)
C-3	M-1	0.00-0.40						Turba orgánica	
	M-2	0.40-3.00	22.80	88.86	48.80	24.80	24.00	CL	A-7-6(16)

Fuente: Municipalidad distrital de San Juan Bautista, mayo 2018. Estudio de Mecánica de Suelos con fines de Cimentación I.E.P.S.M. N° 60778, Nina Rumi. GEO-CONCRET

1.2. BASES TEÓRICAS

1.2.1. Resistividad eléctrica del terreno

La resistividad del terreno es la impedancia del medio en el que se encuentran los electrodos. Puede ser medida en unidades como: $\Omega \cdot m$, $\Omega \cdot cm$ u $\Omega \cdot mm$. Idealmente, esta medida corresponde a la resistencia que presenta un cubo de 1 metro cúbico imaginario de suelo o agua, entre sus paredes laterales (caras) y se representa por la letra griega ρ . (Lavalle, 2021).

Es válido decir que los términos resistividad y resistencia son diferentes y están relacionados matemáticamente por una expresión en la que la resistencia está en función de la resistividad. La resistencia está relacionada con otras propiedades geométricas como la longitud y sección del conductor mientras la resistividad es una propiedad más íntimamente ligada al material y es esta última la que tiende a variar con respecto a la temperatura, humedad y otras propiedades del medio por donde se transporta la corriente eléctrica. (Lavalle, 2021).

Los estudios de la resistividad del terreno no están ligados exclusivamente al campo eléctrico y a los sistemas de puesta a tierra dentro de éste; sino que también posee íntimas relaciones con el contenido mineralógico del suelo, presencia o no de masas freáticas o subterráneas de agua, tipología del suelo, sales disueltas, características y edades cronológicas de las rocas, entre otras muchas menciones a estudios vinculados. Por este motivo, la resistividad aporta una gran información a los científicos de diversas ramas y su cuantificación es esencial por la simplicidad y rapidez de su determinación (Lavalle, 2021).

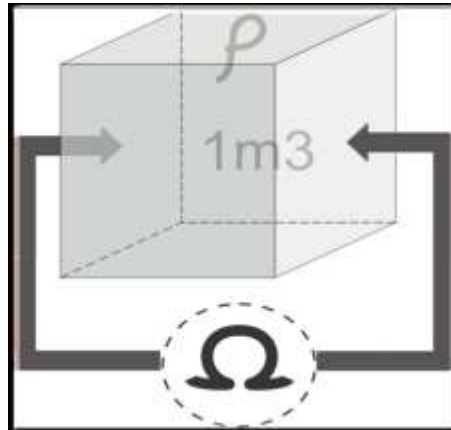


Figura 1. Resistividad de un cubo de determinado terreno de 1m de arista.

En la figura 1 se ilustra una representación de la medida de la resistividad de cierta muestra, nótese que la medida se da entre paredes o caras opuestas del cubo. La medida de la resistividad del terreno es afectada por una gran cantidad de factores y condiciones, algunos con un mayor impacto que otros (Lavalle, 2021).

La resistividad toma sus unidades de la resistencia y las características geométricas del medio en el que se desea medir, como se demostrará a continuación:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L}$$

$$\left(\frac{\Omega \cdot m^2}{m} \right) = \Omega \cdot m$$

Donde:

R= Resistencia (Ω)

P= Resistividad ($\Omega \cdot m$)

L= Longitud (m)

S= Sección (m^2)

Una pregunta que puede surgir a partir de la ecuación (2.1) es ¿Por qué motivo emplear a la resistividad en lugar de la resistencia eléctrica - que es un parámetro mucho más utilizado en el ámbito eléctrico - para caracterizar el terreno como un buen conductor o no? La respuesta a esta interrogante yace en el concepto de cada una de las dos palabras. Mientras la resistencia eléctrica es una propiedad que indica cuánta dificultad enfrenta el paso de electrones en su camino dentro de un conductor; la resistividad representa la resistencia eléctrica específica de un determinado material. Piénsese en dos materiales distintos sometidos a una misma temperatura. Se podría hacer equivalentes dichas resistencias eléctricas modificando parámetros como por ejemplo la sección y/o longitud del conductor (el material con menor resistencia se podría incrementar en su longitud de tal forma que las resistencias lleguen a ser iguales). Este juego de variables geométricas no es posible hacer con la resistividad, pues esta es exclusiva del material. Dichos cambios en la geometría de los conductores no alterarían el valor de su resistividad (Lavalle, 2021).

La resistividad tiene como inversa a la conductividad eléctrica; en tanto, la resistencia tiene a la conductancia como propiedad en el sentido inverso. En otros términos, la resistividad es una propiedad intrínseca del material y no depende de las características geométricas del medio conductor; aunque sí de otro factor como es la temperatura (Lavalle, 2021).

Se puede conocer mucho acerca del terreno en el cual se trabaja, con el solo hecho de conocer su resistividad. En las exploraciones petrolíferas, un valor pico de resistividad indica con una alta probabilidad, la presencia de una acumulación de petróleo en las profundidades (Lavalle, 2021).

Este valor extremadamente elevado se explica por la bajísima conductividad de la corriente eléctrica del petróleo en sí. Como material, el petróleo posee una resistividad de $10^{16} \Omega \cdot m$ (Lavalle, 2021).

De manera análoga, una resistividad de unos cuantos ohmios sugeriría la presencia de aguas subterráneas que muy a menudo son ricas en sales disueltas (Lavalle, 2021).

La Tierra matemáticamente es modelada como un gran conductor eléctrico esférico, y se dice que puede recibir como también aportar carga de una

manera indeterminada. Es gracias a esta característica en la que se basan todos sistemas de puesta a tierra (Lavallo, 2021).

1.2.2. Resistividad de terreno según material natural constituyente

El subsuelo está compuesto por estratos los cuales presentan diferentes valores de resistividad. En la tabla 3, se indica un rango de valores de la resistividad para suelos según los materiales más usuales que lo constituyen (Quispilaya y Cruz 2018)

Tabla 3. Valores de Resistividad en terrenos

Terreno	Resistividad Media ($\Omega.m$)
Arcillas	1 - 10
Limos	10 - 100
Arenas	100 - 1000
Gravas	200 a más de 1000
Roca ígnea y metamórfica inalterada	Mayor a 1000

Fuente: Herrera (2018) en (Quispilaya y Cruz, 2018)

En Perú, el Código Nacional de electricidad – Utilización 2006, Anexo A2 presenta una tabla de tipo de suelos con los siguientes valores de resistividad de suelos.

Tabla 4. Resistividades medias en terrenos típicos

Terreno	Símbolo del terreno	Resistividad media ($\Omega.m$)
Grava de buen grado, mezcla de grava y arena	GW	600-1000
Grava de bajo grado, mezcla de grava y arena	GP	1000-2500
Grava con arcilla, mezcla de grava y arcilla	GC	200-400
Arena con limo, mezcla de bajo grado de arena con limo	SM	100-500
Arena con limo, mezcla de bajo grado de arena con arcilla	SC	50-200
Arena fina con arcilla de ligera plasticidad	ML	30-80
Arena fina o terreno con limo, terrenos elásticos	MH	80-300
Arcilla pobre con grava, arena, limo	CL	25-60
Arcilla inorgánica de alta plasticidad	CH	10-55

Fuente: Código Nacional de electricidad – Utilización 2006 Tabla A2-06

1.2.3. Resistividad aparente

Según Cárdenas & Galvis (2011), la resistividad aparente ρ_a es el valor de resistividad obtenido de una medición directa del terreno (suelo heterogéneo), esta resistividad es una mezcla de las resistividades de diversos materiales. (Quispilaya y Cruz 2018)

El concepto de resistividad aparente surge en medios heterogéneos. La resistividad real coincidiría con la resistividad aparente solo en el caso cuando el terreno es homogéneo (Quispilaya y Cruz 2018).

En la práctica un terreno puede ser razonablemente representado por un modelo de estratos paralelos a la superficie del suelo, caracterizando cada

uno de ellos por su espesor y un valor constante de resistividad según la figura N° 2 (Quispilaya y Cruz 2018).

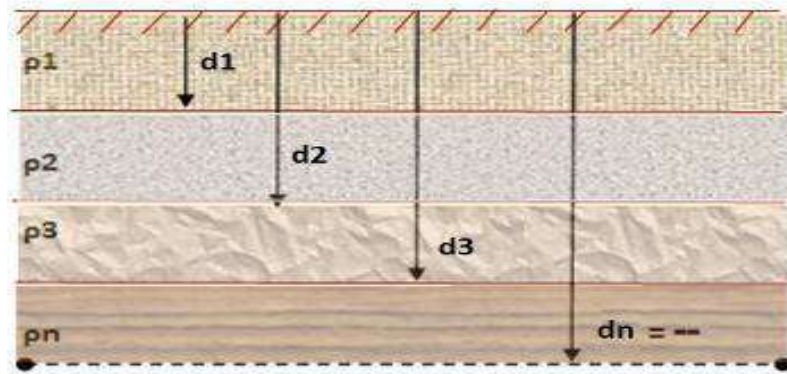


Figura 2. Representación de un suelo estratificado

Fuente: Quispilaya y Cruz (2011).

1.2.4. Factores que afectan la resistividad del terreno

Según Lavalle (2021), existen una gran cantidad de elementos que influyen en la resistividad del terreno, pero se describirá algunos de los más importantes.

Humedad

La humedad que posee el terreno determina fuertemente su resistividad. El agua que contiene el terreno, debido a su estado higrométrico, es la que influye. Siempre que se añada agua a un terreno disminuye la resistividad respecto a la que tendría en seco.

“Uno de los factores más importantes en determinar la resistividad de los suelos es el contenido de agua presente. En las zonas geográficas donde no hay precipitaciones, la capacidad conductora es muy alta tanto en las capas superiores del suelo como también en las inferiores. Por lo contrario, en las zonas con precipitaciones normales las capas superiores poseen resistividades variables de acuerdo con el tipo del mineral constituyente, mientras que las inferiores presentan muy bajas resistividades. De acuerdo con Ortuondo (1997), esto se debe que dependiendo del tipo de material

del que el suelo esté constituido por ejemplo las arcillas, se tendrá una mayor capacidad de retención del agua y por lo tanto una baja resistividad” (Lavalle, 2021).

En 1965, H. J. Albrecht presentó la ecuación, que relaciona la resistividad del suelo, en función de la temperatura y humedad. El estudio presentado es una aproximación empírica, y a pesar de que se puede obtener de manera general con cierta independencia del tipo de mineral, es mejor emplearla para hacer comparaciones de cómo varía la resistividad con dichos parámetros. (Lavalle, 2021).

$$\rho = \frac{1.3 \cdot 10^4}{(0.73 \cdot w^2 + 1)(1 + 0.03 \cdot T)}$$

Donde:

ρ = Resistividad ($\Omega \cdot m$).

W = Humedad del suelo (% en peso)

T = Temperatura ($^{\circ}C$; $T > 0$)

En la figura 21, se muestra la variación de la resistividad, en función de la humedad y temperatura del terreno.

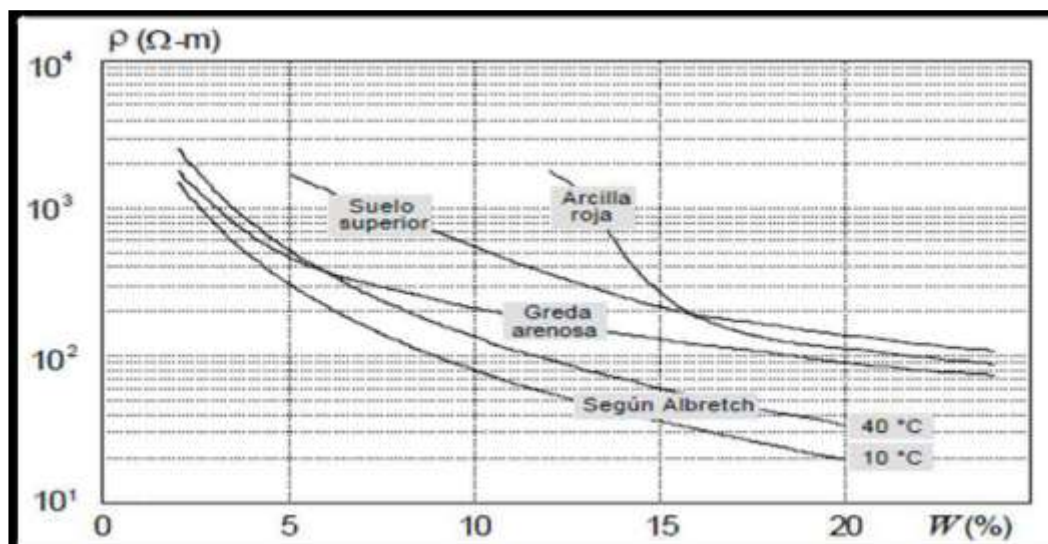


Figura 3. Variación de la resistividad en función de la humedad y dos temperaturas distintas según Albrecht.

Fuente: Ortuondo (1997) en. (Lavalle, 2021).

A mayor humedad disminuye la resistividad y aumenta la corrosión (Loachamin Nasimba, 2019). Cuando están completamente secos, casi todos los suelos tienen una resistividad del orden de aisladores perfectos. La resistividad disminuye rápidamente hasta que la humedad alcanza el 20% a partir de ese porcentaje sólo se consigue una leve disminución de la resistividad con el aumento de la humedad. Inversamente, por debajo del 15% la resistividad aumenta dramáticamente con la disminución de la humedad. Decreciendo la humedad del 30% al 5% la resistividad aumenta alrededor de 400 veces (Loachamin Nasimba, 2019).

Temperatura

La temperatura del terreno también es un factor importante a considerar dentro del estudio de los factores que determinan la resistividad de los suelos. La tierra seca es un aislador excelente; al aire y al sol, las capas de arena seca de la superficie se acercan mucho a la condición de buen aislador. En general, el grosor de tales capas secas no es muy grande, alcanzan sólo entre 10 y 20 centímetros.

“Cuando el valor de la temperatura del suelo se encuentra por encima del punto de congelamiento y por debajo de los 100 grados Celsius, la agitación de las partículas, producida por el aumento de temperatura, dificulta la conducción de la electricidad y por ello aumenta la resistividad. En la figura 4, se muestra la variación de la resistividad del terreno, cuando varía la temperatura. Aparecen dos curvas distintas porque éstas son creadas a partir de concentraciones de sales distintas” (Lavallo, 2021).

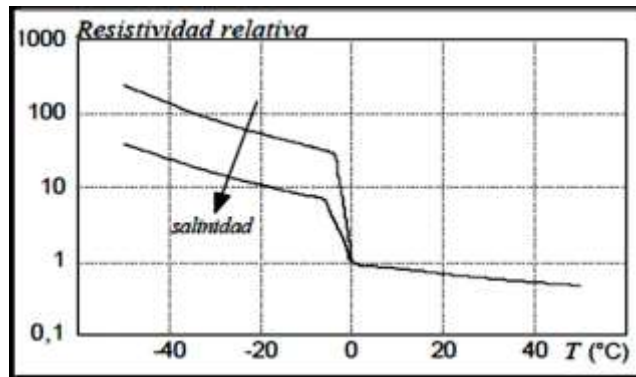


Figura 4. Resistividad relativa, según la variación de temperatura del terreno.

Fuente: Ortuondo (1997).

“Al existir una mayor temperatura menor resistencia y mayor movimiento de electrones en el suelo donde al mismo tiempo reduce la polarización” (Loachamin Nasimba, 2019). La resistividad crece muy lentamente a medida que la temperatura disminuye hasta llegar al punto de congelación del agua. Por debajo del punto de congelación la resistividad crece rápidamente al disminuir la temperatura. Esto tiene importancia en zonas frías donde en invierno el suelo se congela hasta una cierta profundidad. En éstos casos, el sistema de tierra debe instalarse por debajo del nivel de congelación si se pretende un valor aceptable de la resistencia a lo largo de todo el año; por ejemplo, la temperatura disminuye de 20°C a -19°C, la resistividad puede aumentar alrededor de 200 veces. Debido a que la temperatura como la humedad son más estables a mayor distancia de la superficie, se concluye que un sistema de tierra, para ser más efectivo en cualquier época, deberá ser construido con las jabalinas hincadas profundamente.

Este es el propósito que se persigue cuando se llega con el electrodo hasta la capa freática, en este caso, la resistencia no sólo es muy baja, sino que también es estable.

Compactación del suelo

La resistividad del suelo varía directamente con el grado de compactación; al ser menos compacto tendrá menos resistencia” (Loachamin Nasimba, 2019). Una mayor compactación del suelo disminuye la distancia entre las partículas, éstas estarán más contiguas entre sí. Es de esta forma que, si el terreno se encuentra saturado con agua, y es poco compacto, los espacios entre gránulos son menores y estarán llenos de agua, permitiendo así una mejor conductividad a través de la humedad contenida, pero una baja resistencia. A medida que se aumenta el contenido de humedad, se alcanza una especie de saturación ya que el agua envuelve la mayoría de las partículas y un mayor acercamiento entre éstas no influye en la conducción. (Loachamin Nasimba, 2019), (Lavalle, 2021).

La **Figura 5**, muestra el comportamiento de la resistividad con la compactación del terreno. Se puede observar que a medida que el grado de compactación aumenta, la resistividad disminuye” (Lavalle, 2021).

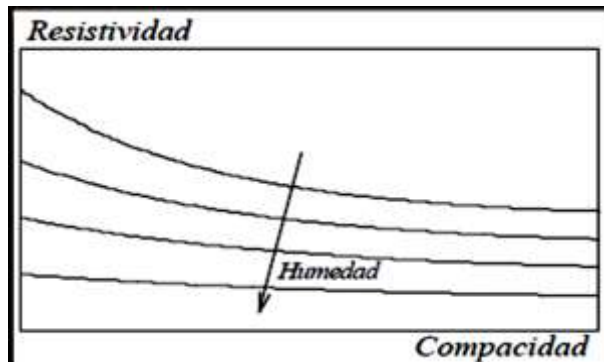


Figura 5. Variación de la resistividad con la compactación del terreno.

Fuente: Ortuondo (1997) en Lavalle (2021).

Concentración de sales disueltas

La concentración de sales disueltas en el terreno es un factor determinante en la resistividad del mismo. Al existir una mayor concentración de sal en el suelo, éste mejora su conductividad. En forma general, entonces, se podría establecer que mejor conductor es el terreno mientras mayor contenido de sal haya en él (Loachamin Nasimba, 2019).

Este parámetro afecta en la conducción eléctrica que se producirá en el suelo de ánodo hacia el cátodo, es decir a mayor salinidad existirá mayor conducción (Loachamin Nasimba, 2019).

Lavalle (2021), señala que, de acuerdo a su composición, los suelos pueden tener cierta capacidad para conducir o no la electricidad. “Conocer la naturaleza del suelo es el primer paso para formarse una idea de la resistividad que posee. Es importante tener en cuenta que las resistividades típicas que se encuentran en diversas literaturas deben ser usadas de manera referencial y no pensar que dichos valores son decisivos” (Lavalle, 2021).

“La concentración de sales disueltas en el terreno posee una gran influencia en el valor de la resistividad del terreno, debido a la naturaleza conductiva de los iones que conforman dichas sales. Es así, que, dependiendo de la concentración de estas, la resistividad del terreno puede variar en amplios rangos de valores.

El agua pura posee una deficiente capacidad para conducir la electricidad. Esto ocurre porque no contiene iones que son los responsables de crear ese camino para que exista la conducción. Es por este motivo que el agua tridestilada posee una alta resistividad que puede llegar incluso a los 100 000 Ω . m. Las aguas encontradas normalmente en el terreno no se encuentran químicamente puras y por lo tanto poseen cierta composición de sales. Esto hace que las aguas subterráneas posean una baja resistividad.

La tabla 5 muestra diversos valores de resistividad de distintos tipos de aguas que, se encuentran en la naturaleza, tanto superficiales, como, subterráneas. Se puede apreciar como los valores van desde décimas hasta miles de ohmios por metro”. (Lavalle, 2021)

Tabla 5. Resistividades de distintos tipos de agua

Tipos de aguas	Resistividad ($\Omega.m$)
Aguas de precipitaciones	30 - 1000
Aguas superficiales de lagos y ríos	
aguas puras	3000
aguas dulces	10 - 1000
aguas salobres	2 - 10
aguas de rocas ígneas	30 - 500
aguas de rocas sedimentarias	10 - 100
aguas de lagos salados	0.1 - 1
Aguas de los suelos	
Medio	100
Suelos de rocas ígneas	30 - 150
Suelos de rocas sedimentarias	1
Aguas subterráneas	1 - 20
Agua marina a 30 grados Celsius	0.2

Fuente: Ortuondo (1997) en Lavalle (2021).

Así mismo, Loachamin Nasimba (2019), precisa que un terreno seco, normalmente, tiene alta resistividad, pero un terreno húmedo también puede tenerla si no contiene sales solubles, es decir el agua es muy blanda. (Loachamin Nasimba, 2019).

Granulometría de los suelos

La granulometría de los suelos, es decir su composición y distribución del tamaño de los granos de un suelo es relevante en la resistividad y varía según las épocas del año. Esto se debe a que el agua producto de las lluvias estacionales, se acumula alrededor de los granos a causa de la tensión superficial. Esto significa que los suelos con granos pequeños tenderán a acumular una mayor cantidad de agua y facilitaría el paso de la corriente eléctrica. Un suelo de diferentes tamaños de granos hace que

los espacios intergranulares disminuyan, minimizando también la resistividad del terreno (Lavallo, 2021).

La estratificación del terreno

“Geológicamente, el suelo está formado por diferentes capas o estratos, que poseen a su vez, profundidades distintas. Estos estratos pueden estar formados por materiales diferentes y por tanto presentar distintas resistividades. Por este motivo, la corriente posee distintas maneras de dispersarse según las capas y la profundidad. La figura 24 ilustra cómo se dispersa la corriente en un suelo formado por dos capas” (Lavallo, 2021).

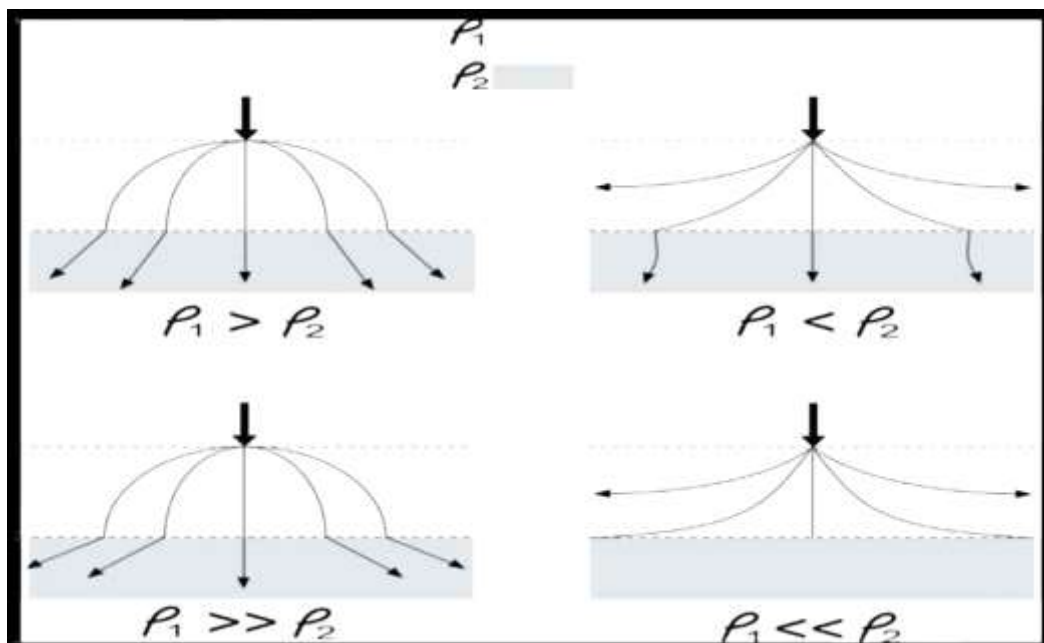


Figura 6. Influencia de la estratificación del terreno con dos capas en la resistividad.

Fuente: Osinergmin orienta (2014) en (Lavallo, 2021)

Anisotropía de la resistividad del terreno

“El término anisotropía significa que las propiedades no son uniformes en todas las direcciones. Por ello, en cierta dirección se obtendrá un valor que puede ser distinto en una dirección diferente. En referencia a la anisotropía

de la resistividad, depende de la orientación en la que se encuentran los cristales como por ejemplo el grafito. Normalmente es un valor que tiene mucha implicancia porque para las mediciones la corriente se disipa por los caminos más fáciles” (Lavalle, 2021).

1.2.5. Valores típicos de resistividad del terreno

a. Resistividad por edad

Tabla 6. Resistividad del suelo según su antigüedad

Edad cronológica	Resistividad del suelo (Ω -m)				
	Arenas húmedas	As	Areniscas	Granitos	Calizas
Cuaternario y terciario	1 a 10	5 a 50	10 a 200	500 a 2000	50 a 5000
Mesozoico	5 a 20	25 a 100	20 a 500	500 a 2000	100 a 10000
Carbonífero	10 a 40	50 a 300	50 a 1000	1000 a 5000	200 a 100000
Paleozoico	40 a 200	100 a 500	100 a 2000	1000 a 5000	1000 a 100000
Precámbrico	100 a 2000	300 a 5000	200 a 5000	5000 a 20000	1000 a 100000

Fuente: Casas (2010) en (Lavalle, 2021).

b. Resistividad por los elementos de constitución del suelo

Tabla 7. Resistividad por constitución del suelo

Clase de terreno	Resistividad (Ω -m)
Tierra pantanosa	50
Tierra arcillosa húmeda	100
Tierra arcillo-arenosa húmeda	200

Tierra arenosa seca	1000
Tierra de arenisca dura	2000
Suelo con estrato de roca	10000
Petróleo	10^{16}

Fuente. Casas (2010) en Lavalle (2021)

Como se mencionó anteriormente, la resistividad eléctrica del suelo es una propiedad intrínseca al tipo de material y sus condiciones físicas, que puedan hacerla variar; por ello, sirve para una buena caracterización del suelo de acuerdo con los valores que se encuentren en su estudio (Lavalle, 2021).

1.2.6. Potencial eléctrico en un espacio homogéneo producido por una corriente

Para evaluar el potencial eléctrico en espacios homogéneos se tiene que asumir las siguientes condiciones (Cobeñas A, 2017):

“El subsuelo consiste en un número finito de capas de extensión lateral infinita separadas por una frontera plana y horizontal. Todas las capas poseen un espesor finito, salvo la última capa que se considera de un espesor infinito”. “Todas las capas son homogéneas e isótropas desde el punto de vista de su resistividad” (Quispilaya y Cruz, 2018).

“Todas las inyecciones de corriente son puntuales, los únicos puntos de entrada de corriente al subsuelo son los electrodos habilitados para tal fin, cuyas dimensiones son despreciables a la escala de la experiencia” (Quispilaya y Cruz, 2018). “Según Estrada (2012), se tiene que considerar que la corriente se distribuye en todas las direcciones, si el medio o el suelo es homogéneo e isotrópico, por lo cual se asume que la intensidad de corriente se propaga radialmente. Como resultado a una distancia r tendremos una semiesfera (su otra mitad es el aire), que es el área que atraviesa las líneas de corriente” (Quispilaya y Cruz, 2018).

Con ayuda de unos electrodos se introduce en el suelo homogéneo y de resistividad (ρ) una corriente (I) como se muestra en la Figura 7, el punto de contacto actúa como una fuente de corriente, a partir del cual, la corriente se dispersa hacia fuera y fluye en forma radial. Las líneas del campo eléctrico (E) se ubican paralelas al flujo de corriente y perpendicular a la superficie equipotencial (líneas de igual voltaje) que se encuentran en forma semiesférica.

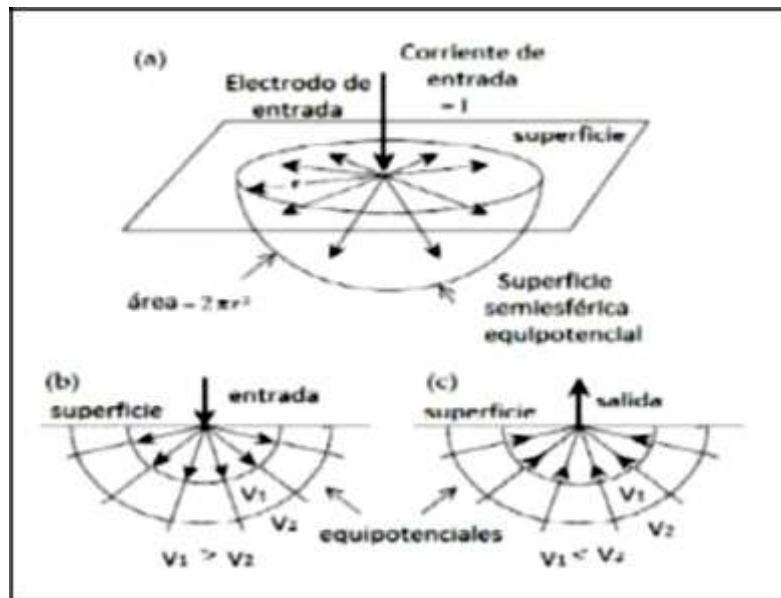


Figura 7. Líneas de campo eléctrico y superficies equipotenciales

Descripción: Líneas de campo eléctrico y superficies equipotenciales alrededor de un electrodo en un semiespacio uniforme. a) Superficie equipotencial semiesférica, b) líneas de campo radialmente hacia fuera alrededor de una fuente (entrada), c) líneas (salida).

Mediante la ley de Ohm calculamos la resistencia R que se opone al paso de esa corriente (I) en un casquete semiesférico de radio r y espesor " dr " como se muestra en la figura N° 8.

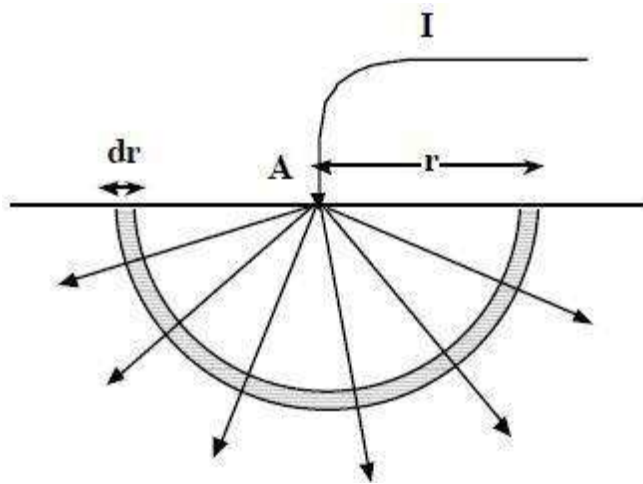


Figura 8. Ley de Ohm aplicado a la superficie de un suelo

Fuente: Quispe (2016)

1.2.7. Tipos de prospecciones para medición de resistividad del terreno por una corriente

a. Usando la información geológica y muestras de suelo

A menudo donde se va a instalar tanques para almacenamiento de petróleo o derivados de éste, se deben realizar extensos trabajos de ingeniería civil. Este trabajo generalmente involucra prospecciones geológicas y estudios de Mecánica de Suelos y Mecánica de Rocas, - competencias de un Ingeniero Civil -, que resultan en una cantidad considerable de información sobre la naturaleza y configuración del sitio donde se va a cimentar la estructura de los tanques (Lavallo, 2021).

“La determinación de resistividad del terreno a partir de los valores de resistencia medidos entre caras opuestas de una muestra de suelo de dimensiones conocidas no se recomienda, ya que las resistencias interfaciales desconocidas de la muestra de suelo y los electrodos están incluidas en el valor medido. Una determinación es más precisa si se realiza una medición de resistencia de cuatro terminales de la muestra de suelo.

Los terminales de potencial, encargados de medir el voltaje, deben ser pequeños, en relación con la sección transversal de la muestra, y deben estar lo suficientemente distantes de los terminales de corriente para asegurar una distribución de corriente casi uniforme en la muestra. Una distancia igual al ancho de la mayor sección transversal suele ser adecuada para el propósito de la determinación.

Es difícil, y en algunos casos, imposible obtener una aproximación útil de la resistividad del suelo a partir de la resistividad medidas en muestras. Esto se debe a la dificultad de obtener muestras de suelo representativas y homogéneas, y que posean el mismo nivel de compactación del suelo original, junto con el contenido de humedad en la celda de prueba. (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1983)” (Lavalle, 2021).

b. Sondeo eléctrico vertical

“El sondeo eléctrico vertical es el tipo de método más empleado para medir resistividad del terreno e incluso aproximar el espesor de los estratos que conforman el suelo.

Mediante este tipo de medición, se elige un centro y una dirección de medición. Estas dos referencias se mantienen fijas hasta que la medición culmine. Mediante el equipo de medición, que puede ser un telurómetro, se colocan los electrodos tomando como referencia el centro y dirección previamente establecidos, a una distancia entre ellos. El principio general de funcionamiento de este método básicamente consiste en inyectar corriente entre dos electrodos y al dispersarse la corriente en el suelo, medir la diferencia de potencial entre los dos electrodos restantes.

Una vez se obtengan los valores de resistividad, a este valor se le denomina resistividad aparente. De manera usual, para una mejor visualización de los resultados, se obtienen gráficos como el que se muestra a continuación en la figura 9. Lo normal es dibujar estos gráficos utilizando escalas logarítmicas en ambas coordenadas, para poder interpretarlos mediante curvas patrón, especialmente construidas para

ello. Otros métodos de interpretación, menos usuales, pueden requerir de gráficos con otros tipos de escalas (Ortuondo, 1997) (Lavalle, 2021).

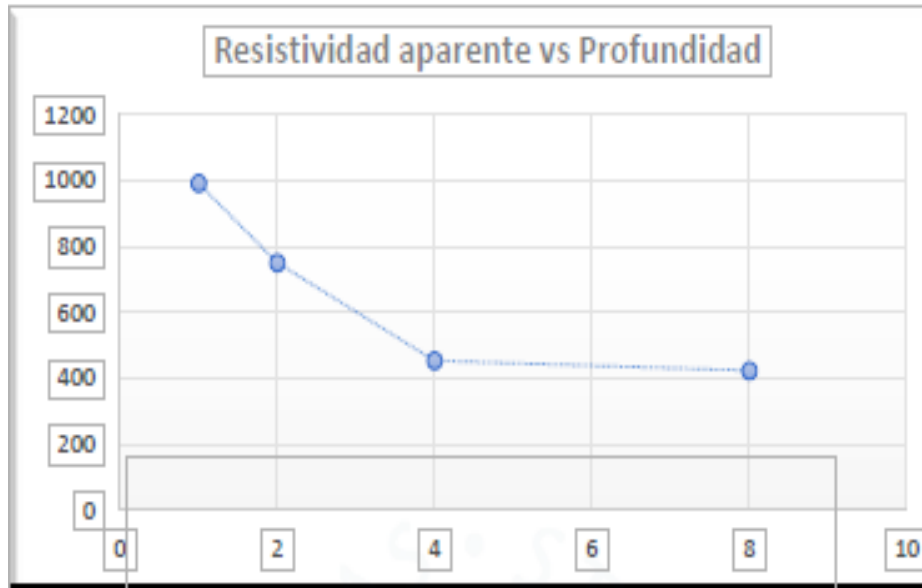


Figura 9. Resistividad aparente vs profundidad

Descripción: Resistividad aparente vs profundidad usando método de sondeo

Vertical, con configuración de Wenner.

Fuente: (Lavalle, 2021).

Este método puede poseer distintas configuraciones entre los electrodos, dependiendo de la distancia entre ellos. Dichas configuraciones, pueden ser de Wenner, Schlumberger o azimutal. Sin embargo, las dos primeras son las más empleadas.

La **Figura 10**, muestra la correcta e incorrecta aplicación de la configuración de Wenner, como se aprecia en la figura, la parte derecha cambia el centro de referencia de cada medición, cuando lo correcto debe ser mantener una simetría respecto a un mismo eje (parte izquierda) (Lavalle, 2021).

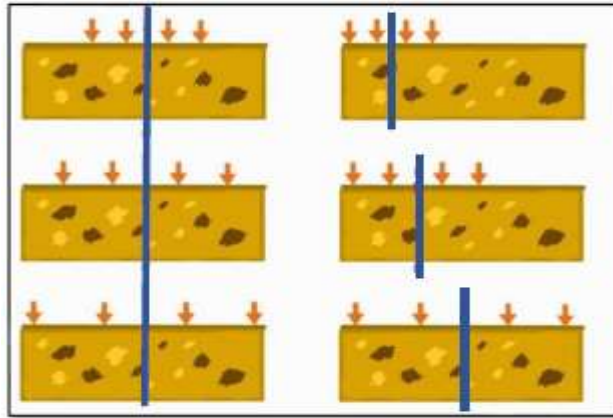


Figura 10. Aplicación correcta e incorrecta del método de Wenner.

Fuente: (Lavallo, 2021).

c. Calicatas eléctricas

“Las calicatas eléctricas se emplean para averiguar la variación horizontal de la resistividad en el terreno. Estas variaciones laterales pueden ser por la presencia de acumulación de cierto material, diferente al del medio circundante. Permite detectar fallas geológicas. Entre otras aplicaciones, se encuentra su uso en la determinación de edificaciones y sitios arqueológicos enterrados. La **Figura 11**, muestra las variaciones laterales típicas en el terreno y la forma en cómo se apreciarían haciendo un corte transversal” (Lavallo, 2021).

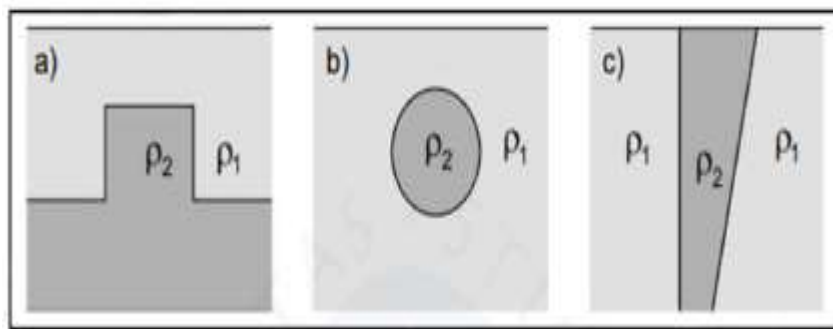


Figura 11. Variaciones laterales típicas en un terreno

Descripción: Variaciones laterales típicas en un terreno. a) Inclusión de un estrato en otro superior, b) acumulación de material diferente al alrededor, c) contactos de distintos materiales.

Fuente: Ortuondo (1997) en Lavallo (2021).

“Entre las muchas configuraciones de colocar los electrodos en este método, se explica a continuación y de manera breve, una manera, la calicata de dispositivo simétrico. Esta forma se puede realizar con las configuraciones de Wenner o Schulumberger, variando la distancia de los electrodos acorde con la configuración, y se realiza una secuencia de medición cada intervalo de tiempo aproximadamente constante. Todos los electrodos se desplazan de manera horizontal (perpendicular a la línea de ubicación de los electrodos)” (Lavallo, 2021).

“Este método carece de fundamento, si todos los estratos del suelo están ubicados de manera paralela entre sí, es decir si el suelo es perfectamente uniforme, debido a que todos los resultados medidos, serían iguales. No obstante, si el suelo presenta variaciones laterales, mientras más próximo está el conjunto de electrodos al punto de anomalía, más se modifica el valor de resistividad aparente medido. Al alejar los electrodos, disminuye el efecto de la anomalía horizontal y la resistividad aparente se acerca a la correspondiente a un suelo perfectamente estratificado. La figura 12, muestra la disposición de los electrodos en este método usando la configuración de Wenner” (Lavallo, 2021).

“Esta forma de medición no presta utilidad en la determinación de la composición de los suelos, si están formados por estratos idealmente paralelos a la superficie del terreno. Sin embargo, como en la realidad los estratos tienen siempre algún grado de inclinación, el perfil eléctrico puede ser útil para cuantificar esta variación lateral. Si el terreno presenta anomalías laterales importantes, el perfil eléctrico es recomendable como complemento al sondeo eléctrico (Ortuondo, 1997) en Lavallo (2021).

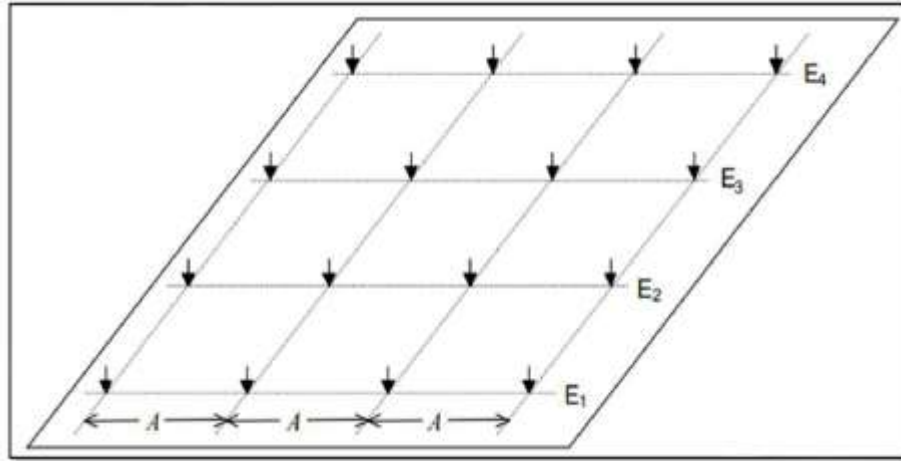


Figura 12. Calicata eléctrica usando la configuración de Wenner.

Fuente: Ortuondo (1997) en Lavalle (2021)

d. Tomografía eléctrica resistiva

“El método de tomografía eléctrica resistiva nos permite investigar la variación de la resistividad del subsuelo a profundidad y lateralmente. Se inyecta corriente continua al terreno mediante electrodos y para conocer la diferencia de potencial contra otros electrodos” (Lavalle, 2021).

La relación entre estas nos proporciona una resistividad que nos permite identificar con gran exactitud el material en el subsuelo.

Para la obtención de las imágenes en 2D o 3D, por cada medición, una corriente eléctrica, DC, se inyecta en el suelo a través de dos electrodos (A y B). El potencial resultante se mide entre dos electrodos (M y N). Un valor de resistividad aparente se deriva de la corriente inyectada, voltaje medido y el factor geométrico. Los datos medidos se invierten para producir un modelo de la distribución de la resistividad eléctrica real del subsuelo (solución no-única). La distribución de la resistividad eléctrica se correlaciona con la geología del subsuelo o se interpreta en términos geológicos. Existe dentro de la literatura figuras que, ejemplifica una aplicación de la tomografía eléctrica resistiva y las gráficas que se generan en 2D. (Lavalle, 2021).

Según, Cartomex (2015), la profundidad de sondeo usualmente es mayor a 100 metros y sus aplicaciones para los estudios de resistividad son, básicamente para: exploración de minerales, exploración de aguas subterráneas, caracterización geotécnica, túneles y fugas de agua en presas, detección de cavidades, discontinuidades y fallas, estudios ambientales, entre otras muchas más aplicaciones (Cartomex, 2015).

1.2.8. Métodos de medición de la resistividad del suelo

“La resistividad eléctrica se mide haciendo pasar una corriente eléctrica en el terreno entre dos electrodos y la medición de la diferencia de potencial V generada por el paso de la corriente entre otros dos electrodos. La resistencia se calcula utilizando la ley de ohm, esta resistencia se multiplica por un factor geométrico en relación a la configuración de los electrodos para calcular la resistividad eléctrica del subsuelo afectado por el paso de la corriente (Gonzales, 2010)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

“Cuando se utiliza corriente alterna (CA) en el suelo con frecuencias entre 2 y 100 kHz la conductividad eléctrica resulta independiente de la frecuencia, cumpliéndose la ley de Ohm (Cuñez Uvidia, 2015)”. (Quispilaya y Cruz, 2018).

“Los métodos Wenner y Schlumberger, son los de mayor uso, los cuales consisten en inyectar una corriente eléctrica al terreno, por medio de electrodos auxiliares dispuestos en el terreno en un arreglo geométrico, y de acuerdo a la medición de tensión obtenida sobre el terreno, se calcula la resistencia aparente del medio, con este valor calculado se puede obtener el valor de la resistividad del suelo. Para realizar estas mediciones, el equipo debe utilizar señales de prueba inferiores a 9 kHz o incluso menores a 3kHz (Sanz, Duque, & Gomez, 2010)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

a. Método de variación de profundidad

Este método, a veces llamado método de tres puntos, es una prueba de resistencia a tierra que se lleva a cabo varias veces, cada vez la profundidad de enterramiento del electrodo probado aumenta en un incremento dado y de ahí el nombre del método. El propósito de esto es forzar más corrientes de prueba a través de la profundidad del suelo. El valor de resistencia medido reflejará la variación de resistividad a un aumento de profundidad. Por lo general, el electrodo probado es una varilla. Se prefieren las varillas a otros tipos de electrodos porque ofrecen dos ventajas importantes:

- El valor teórico de la resistencia de la varilla de tierra es simple de calcular con precisión adecuada, por lo tanto, los resultados son fáciles de interpretar.
- La inserción de una varilla es en frecuencia una operación fácil de realizar.

El método de variación de profundidad proporciona información útil sobre la naturaleza del suelo en las proximidades de la varilla (de 5 a 10 veces la longitud de la varilla).

Si se debe investigar un gran volumen de suelo, es preferible utilizar el método de cuatro puntos, ya que la conducción de varillas largas no es práctica. (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1983).

b. Método de los cuatro puntos

“En la práctica, es uno de los métodos más exactos para medir la resistividad promedio de grandes volúmenes de tierra no perturbada. Pequeños electrodos están enterrados en cuatro pequeños agujeros en la tierra, todos a la profundidad “b” y espaciados en una línea recta a intervalos “a”.

Se pasa una corriente de prueba I entre los dos electrodos externos y el potencial V entre los dos electrodos internos se mide con un potenciómetro o un voltímetro de alta impedancia. Entonces V / I da la resistencia R en ohmios. (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1983).

La mayoría de los dispositivos modernos, poseen de manera predefinida (usando una fórmula precargada al dispositivo, acorde con el método), la posibilidad de escoger las distancias de medición y con una profundidad de enterramiento ya estándar acorde con las varillas empleadas. El valor usual de dicha profundidad para las varillas es de 0.25 m” (Lavallo, 2021).

“Dentro del método existen tres tipos de configuraciones de los electrodos posibles: Configuración de Wenner; Configuración de Schlumberger; y, la Configuración azimutal” (Lavallo, 2021).

c. Configuración de Wenner

En esta configuración los electrodos están igualmente espaciados. La distancia “a” es la distancia entre dos electrodos adyacentes tal y como se muestra en la figura 13.

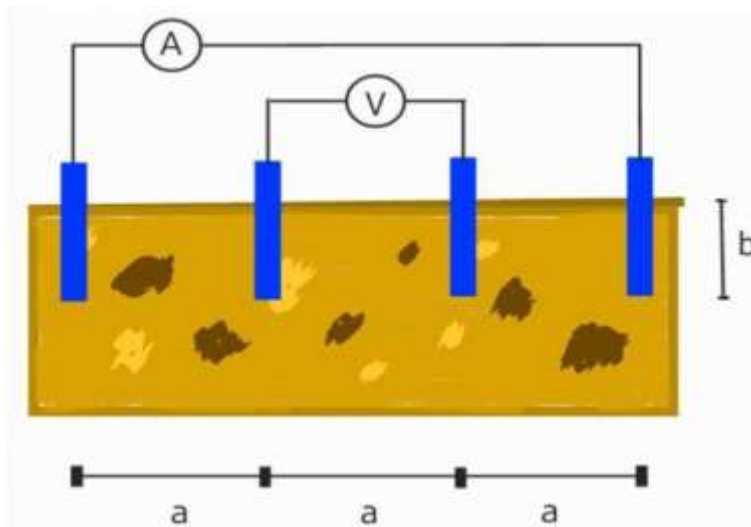


Figura 13. Configuración de Wenner.

Fuente: (Lavallo, 2021)

Dentro de esta configuración, se encuentran algunas variantes como por ejemplo Wenner alfa, Wenner beta o Wenner gamma. La variante más común es Wenner alfa. Las otras dos variantes se diferencian en el orden en el cual se colocan los electrodos de corriente y potencial. De acuerdo con dicho orden cada una de las variantes posee una fórmula distinta.

Aclarado lo anterior, la resistividad para Wenner alfa, en términos de las unidades en las que “a” y “b” están medidas es:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

Se debe recalcar que la fórmula expresada en la ecuación 2.4, no aplica a cualquier tipo de varilla ni a cualquier profundidad “b”, sino que aplica a pequeños electrodos, enterrados una profundidad “b”, con cables aislados. Sin embargo, cuando la profundidad es no mayor a 0.1a, se puede asumir que la profundidad b=0 y la formula se convierte en:

$$\rho = 2\pi a R$$

La ecuación anterior, entrega como resultado, la resistividad del suelo aproximada a una profundidad “a”, cuando “b” es despreciable. (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1983).

d. Configuración de Schlumberger

Esta configuración también llamada de arreglo de Schlumberger-Palmer, arreglo desigualmente espaciado surgió gracias a una debilidad de la configuración de Wenner. La figura 14, muestra cómo se disponen los electrodos en esta configuración.

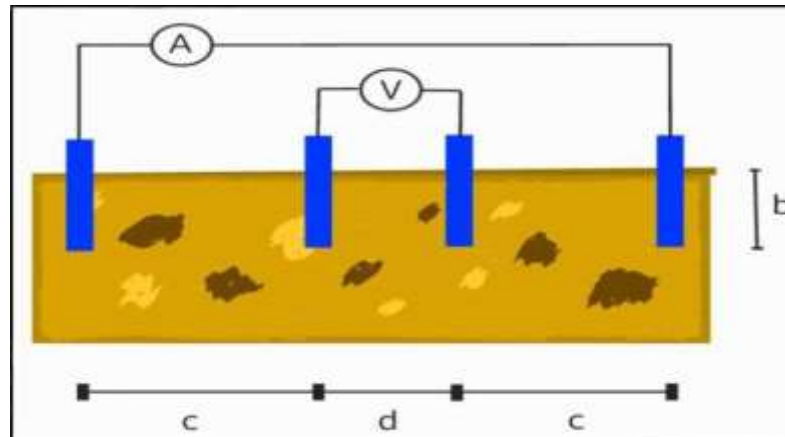


Figura 14. Configuración de Schlumberger.

Fuente: (Lavalle, 2021).

Uno de los defectos principales de la configuración de Wenner, es el abrupto decrecimiento en la magnitud del potencial entre los electrodos interiores, cuando su espaciado es incrementado a relativamente grandes valores. En ocasiones los instrumentos comerciales son inadecuados para medir un potencial tan bajo. Por este motivo, para medir resistividades con largos espaciados entre los electrodos de corriente se usa la configuración de Schlumberger con resultados satisfactorios. La fórmula usada en este caso puede ser fácilmente determinada.

En la mayoría de los casos, la profundidad de enterramiento de los electrodos suele ser aproximadamente 0.25 metros, la cual, para distancias muy grandes de medición, es pequeña en comparación a la separación de electrodos d y c .

En dicha situación, la resistividad puede ser calculada de una manera más rápida con la aplicación de la ecuación que sigue a continuación:

$$\rho = \frac{\pi c(c + d)R}{d}$$

1.2.9. Normatividad aplicada a la medición de la resistividad del suelo

Lavalle (2021) recomienda usar, además de las normativas mencionadas en el marco teórico, otras que tratan más explícitamente sobre la medición y los métodos de interpretar las mediciones. Se puede mencionar a las siguientes:

- *AIEE 81 Measuring Ground Resistance and Potential Gradients in the Earth (1962).*
- *ANSI C2 National Electric Safety Code (NESC) (2000).*
- *ANSI/IEEE 81 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance (1983).*
- *ASTM G57 Standard Test Method for Measurement Soil Resistivity (1995).*
- *IEC 60479-1 Effects of current on human beings. Part 1 General Aspects (2005).*
- *IEC 61557-1/9 Electrical Safety in low Voltage Distribution Systems up to 1000 V AC (Alternating current) and 1500 V DC (Direct Current) Equipment for Testing, Measuring of Protective Measures.*
- *NFPA 70 National Electrical Code (NEC) (2008).*

1.2.10. Suelos

Jara (2014), en su trabajo de tesis sobre “Efecto de la cal como estabilizante de una sub rasante de suelo arcilloso” haciendo referencia a Juárez y Rico (2005), manifiesta que “Es común creencia que el suelo es un agregado de partículas orgánicas e inorgánicas, no sujetas a ninguna organización; pero en realidad se trata de un conjunto con organización definida y propiedades que varían "vectorialmente". En la dirección vertical generalmente sus propiedades cambian mucho más rápidamente que en la horizontal. El suelo tiene perfil, y éste es un hecho del que se hace abundante aplicación” (Juárez y Rico, 2005).

a. El origen de los suelos

La mayoría de los suelos que cubren la tierra están formados por la meteorización de las rocas. Los geólogos emplean el término meteorización de las rocas para describir todos los procesos externos, por medio de los cuales la roca experimenta descomposición química y desintegración física, proceso mediante el cual masas de roca se rompen en fragmentos pequeños.

Los suelos que provienen de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas presentan características diferentes si la alteración es física o química. Y así, cuando el efecto alterativo de las rocas se lleva a cabo por un medio físico se produce un suelo con la misma composición de ellas (Crespo, 2007).

Esta fragmentación continua, debida a los agentes físicos como el sol, el agua, el viento y los glaciares, es un mero cambio físico y por eso se llama también meteorización mecánica (Jara, 2014). Por otra parte, la meteorización química de una roca para dar origen al suelo, es un proceso de descomposición, mediante el cual los minerales constitutivos de las rocas madre cambian su constitución mineralógica de él debido principalmente a los agentes químicos, como la oxidación, carbonatación, y la hidratación. (Crespo, 2007).

La meteorización mecánica es el proceso por el cual las rocas se fracturan en piezas de menor tamaño bajo la acción de las fuerzas físicas, como la corriente de agua de los ríos, viento, olas oceánicas, hielo glacial, acción de congelación, además de expansiones y contracciones causadas por ganancia y pérdida de calor (Muelas s.f.), (Jara, 2014).

En la descomposición química, los minerales persistentes se transforman en minerales de composición y propiedades físicas diferentes. Es preciso indicar que la desintegración física completa 1a

descomposición, ya que los minerales y partículas rocosas de menor tamaño producidos por meteorización mecánica son mucho más susceptibles al cambio químico que los granos minerales firmemente soldados en grandes masas de roca compacta (Muelas s.f.), (Jara, 2014).

La meteorización química es el proceso de descomposición química de la roca original. Entre los distintos procesos de alteración química pueden citarse: la hidratación (paso de anhidrita a yeso), disolución (de los sulfatos en el agua), la oxidación (de minerales de hierro expuestos a la intemperie), la cementación (por agua conteniendo carbonatos), etc., (Jara, 2014).

Por ejemplo, la meteorización química de los feldespatos puede producir minerales arcillosos (Muelas s.f.).

Muy relacionada con la meteorización química se encuentra la meteorización biológica, producida fundamentalmente por la actividad bacteriana, originando putrefacciones en materiales orgánicos. (Muelas s.f.).

La acción conjunta o individual de estos procesos de meteorización da lugar a un perfil de meteorización de la roca en función de la profundidad. En este perfil la roca sana ocupa la zona más profunda, transformándose gradualmente a suelo hacia la parte más superficial. (Muelas s.f.).

Así, por ejemplo, la observación de una trinchera recién abierta (una excavación para una carretera, una pared de cantera, etc.), a menudo revelará una sucesión de capas de diferentes materiales térreos. En la base del afloramiento puede haber roca compacta denominada roca firme; se encuentra todavía en su lugar de origen y está relativamente poco modificada. La roca firme suele presentar innumerables grietas, denominadas juntas o diaclasas, que son consecuencia de esfuerzos principalmente asociados a una historia anterior de procesos tectónicos.

Allí donde existen familias de juntas que se cruzan, la roca se desintegra fácilmente en bloques. (Muelas s.f.).

Por encima de la roca firme puede haber una capa de materia mineral blanda, denominada regolita. (El prefijo rego viene de la palabra griega que significa “manto”.) La regolita puede formarse in situ por descomposición y desintegración de la roca firme inmediatamente subyacente; este tipo se denomina regolita residual o suelo residual. Si esta capa de partículas minerales relativamente sueltas o blandas, dispuestas sobre la roca firme, es transportada por agentes tales como corrientes de agua, hielo, viento, olas, recibe el nombre de regolita transportada o suelo sedimentario (Muelas s.f.).

b. Suelos residuales

Los suelos residuales se originan cuando los productos de la meteorización de las rocas no son transportados como sedimentos, sino que se acumulan in situ. Si la velocidad de descomposición de la roca supera a la de arrastre de los productos de descomposición, se produce una acumulación de suelo residual. Entre los factores que influyen sobre la velocidad de alteración en la naturaleza de los productos de meteorización están el clima (temperatura y lluvia), el tiempo, la naturaleza de la roca original, la vegetación, el drenaje y la actividad bacteriana. Los suelos residuales suelen ser más abundantes en zonas húmedas, templadas, favorables al ataque químico de las rocas y con suficiente vegetación para evitar que los productos de meteorización sean fácilmente arrastrados. (Muelas s.f.).

Carrillo-Gil (1978), tratando sobre los ensayos de laboratorio de suelos residuales, señaló: “En el Perú, los suelos tropicales en un gran porcentaje son de tipo saprolíticos, esto es, suelos arcillosos mezclados con limo y arena principalmente.

c. Suelos sedimentarios

La formación de los suelos sedimentarios puede explicarse más adecuadamente considerando la formación, el transporte y el depósito de los sedimentos. (Muelas s.f.).

El modo principal de la formación de sedimentos lo constituye la meteorización física y química de las rocas en la superficie terrestre. En general, las partículas de limo, arena y grava se forman por la meteorización física de las rocas, mientras que las partículas arcillosas proceden de la alteración química de las mismas. (Muelas s.f.).

Según Muelas s.f, los sedimentos pueden ser transportados por cualquiera de los cinco agentes siguientes: agua, aire, hielo, gravedad y organismos vivos. El transporte afecta a los sedimentos de dos formas principales:

- a) Modifica la forma, el tamaño y la textura de las partículas por abrasión, desgaste, impacto y disolución;
- b) Produce una clasificación o graduación de las partículas.

Después de que, las partículas se han formado y han sido transportadas se depositan para formar un suelo sedimentario. Las tres causas principales de este depósito en el agua son la reducción de la velocidad, la disminución de la solubilidad y el aumento de electrolitos. Cuando una corriente de agua desemboca en un lago, océano, etc., pierde la mayor parte de su velocidad. Disminuye así la fuerza de la corriente y se produce una sedimentación. Cualquier cambio en la temperatura del agua o en su naturaleza química puede provocar una reducción en la solubilidad de la corriente, produciéndose la precipitación de algunos de los elementos disueltos. (Muelas s.f).

Muelas s.f, concluye que, el suelo es el resultado del proceso de meteorización de las rocas, con o sin transporte de los productos de alteración. Los suelos se caracterizan fundamentalmente por los siguientes aspectos:

- Los suelos están formados por partículas pequeñas (desde micras hasta algunos centímetros) e individualizadas que pueden considerarse indeformables.
- Entre estas partículas quedan poros con un volumen total del orden de magnitud del volumen ocupado por ellas (desde la mitad a varias veces superior).
- Un suelo en particular, es un sistema multifase (sólida, líquida y gaseosa).
- Los poros pueden estar llenos de agua (suelos saturados), o con aire y agua (suelos semisaturados), lo que condiciona la respuesta de conjunto del material.

En condiciones normales de presión y temperatura, el agua se considera incomprensible. (Muelas s.f).

1.2.11. Propiedades físicas y clasificación de los suelos

a. Relaciones peso-volumen

Como se mencionó anteriormente, el suelo constituye un sistema de tres fases diferenciadas: la sólida (partículas minerales), la líquida (agua generalmente) y la gaseosa (aire o gas). Un elemento de suelo natural se lo separa en sus tres fases para facilitar la deducción de las relaciones entre ellas (Das, 2001).

Las propiedades físicas se expresan, básicamente, a partir de las relaciones peso-volumen, (relaciones en volumen y relaciones en peso), la densidad o compacidad relativa, granulometría y plasticidad. Las relaciones en volumen son: índice de huecos o poros, porosidad y grado de saturación; y, las relaciones en peso: Humedad, peso específico de las partículas sólidas, peso específico del agua, peso específico seco, peso específico aparente y peso específico saturado (Das, 2001).

b. Densidad o compacidad relativa

La densidad relativa es una magnitud muy empleada para caracterizar la compacidad de un suelo granular; y está definida como:

$$D_r = \frac{e_{m\acute{a}x} - e}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}} \times 100 = \frac{\gamma_{dm\acute{a}x}}{\gamma_d} \times \frac{\gamma_d - \gamma_{dm\acute{i}n}}{\gamma_{dm\acute{a}x} - \gamma_{dm\acute{i}n}} \times 100$$

Siendo:

$e_{m\acute{a}x}$: Índice de huecos del suelo en el estado más suelto

$e_{m\acute{i}n}$: Índice de huecos del suelo en el estado más denso

e : Índice de huecos in situ

γ_d : Peso específico seco in situ

$\gamma_{dm\acute{a}x}$: Peso específico seco en el estado más denso ($e_{m\acute{i}n}$)

$\gamma_{dm\acute{i}n}$: Peso específico seco en el estado más suelto ($e_{m\acute{a}x}$)

En la tabla siguiente se indican las denominaciones de la compacidad de los suelos granulares a partir de su densidad relativa:

Tabla 8. Denominaciones de la compacidad (Das, 2001)

Densidad relativa (%)	Denominación
0 - 15	Muy suelto
15 - 35	Suelto
35 - 65	Medio
65 - 85	Denso
85 - 100	Muy denso

Fuente: Das, 2001

c. Granulometría

En cualquier masa de suelo, los tamaños de las partículas varían considerablemente, es decir su distribución no es uniforme. Para clasificar apropiadamente un suelo se debe conocer su distribución granulométrica, es decir, la distribución, en porcentaje, de los distintos tamaños dentro del suelo. (Muelas s.f).

La distribución granulométrica de partículas de tamaño superior a 0,08 mm se determina generalmente mediante un análisis granulométrico por tamizado. Para partículas de tamaño inferior al mencionado (0,08 mm) se emplea la granulometría por sedimentación. (Muelas s.f).

El análisis granulométrico por tamizado se efectúa tomando una cantidad medida de suelo seco, bien pulverizado y pasándolo a través de una serie de tamices (cuyo tamaño de malla suele ir disminuyendo en progresión geométrica de razón 2), agitando el conjunto. La cantidad de suelo retenido en cada tamiz se pesa y se determina el porcentaje acumulado de material que pasa por cada tamiz. (Muelas s.f).

El porcentaje de material que pasa por cada tamiz, determinado de la forma anterior, se representa en un gráfico semilogarítmico. El diámetro de la partícula se representa en una escala logarítmica (abscisas), y el porcentaje de material que pasa se representa en escala aritmética (ordenadas), (Muelas s.f).

Según Muelas s.f, una vez determinada dicha curva granulométrica, existen dos coeficientes que se utilizan para una mejor descripción de la granulometría de un suelo. Estos coeficientes son:

- **Coeficiente de uniformidad:** $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$
- **Coeficiente de curvatura:** $C_c = \frac{(D^2)_{30}}{D_{60} \times D_{10}}$

El coeficiente de uniformidad representa la relación entre el diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa un 60% de material y el diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa un 10%. (Das, 2001).

El coeficiente de curvatura del suelo, también llamado de graduación, si adopta valores entre 1 y 3 se considera suelo bien graduado. Se determina dividiendo el cuadrado del diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa un 30% del material, entre el producto de los diámetros

correspondientes a los tamices por los que pasa un 60% y un 10% del material. (Muelas s.f).

Das (2001), al tratar del análisis granulométrico con el hidrómetro, señala que: El análisis granulométrico por sedimentación (partículas de tamaño inferior a 0,08 mm) se lleva a cabo con el hidrómetro, y se basa en el principio de la sedimentación de las partículas de suelo en agua. Los hidrómetros están calibrados para mostrar la cantidad de suelo que está aún en suspensión en cualquier tiempo dado, t. El diámetro máximo de las partículas de suelo, aún, en suspensión en el tiempo t se determina mediante la ley de Stokes:

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{(G_s - 1)\gamma_w}} \sqrt{\frac{L}{t}}$$

Donde:

D = diámetro de la partícula de suelo

G_s = peso específico de los sólidos

η = viscosidad del agua

γ_w = peso específico del agua

L = longitud efectiva (es decir, longitud medida de la superficie del agua en la probeta al centro de gravedad del hidrómetro.

t = tiempo

Las partículas de suelo con diámetros mayores que los calculados con la ecuación anterior se habrán asentado más allá de la zona de medición. Así, con lecturas tomadas en tiempos diferentes en el hidrómetro, el porcentaje de suelo más fino que un diámetro dado puede calcularse y prepararse, a partir de los diámetros, una gráfica de la distribución granulométrica de los suelos (Das, 2001).

Por su parte, Crespo Villalaz (2007), en su libro Mecánica de Suelos y

Cimentaciones, Sexta Edición, Limusa Noriega Editores, señala: Los Procedimientos para la determinación de los tamaños de partículas menores a 0.074 mm están basados en la Ley de Stokes, que da la velocidad de sedimentación de partículas sólidas esféricas en un líquido. La velocidad de sedimentación está dada por la fórmula:

$$v = \frac{2 \cdot g \cdot r^2 (D_a - D_w)}{9 \cdot \rho} = \frac{H}{t}$$

En la que:

v = Velocidad de caída de las partículas en cm/seg.

g = Aceleración de la gravedad en cm/seg²

r = Radio de la esfera en cm

D_a = Densidad absoluta del material en g/cm³

D_w = Densidad absoluta del agua en g/cm³.

ρ = Viscosidad absoluta del agua en g/cm.seg

H = Altura de caída de la esfera en cm

t = Tiempo transcurrido, en seg.

Con agua a 20°C, $\rho = 0.0101$ g/(cm.seg) y con esferas de densidad absoluta de 2.65 g/cm³, que es un valor medio entre los minerales que se encuentran en el suelo, la fórmula anterior se transforma, quedando así:

$$v = 35,613.86 r^2$$

Con los dos métodos de análisis granulométrico expuestos, tanto el por tamizado, como con el hidrómetro, puede determinarse la curva granulométrica completa de una muestra de suelo (ver curvas granulométricas adjuntas).

En función de la granulometría se clasifican los suelos en cuatro grandes grupos: gravas, arenas, limos y arcillas. Las arcillas, están constituidas por minerales de silicatos, constituidos por cadenas de elementos tetraédricos y octaédricos, cuyas partículas tienen tamaños inferiores a 0.002mm.

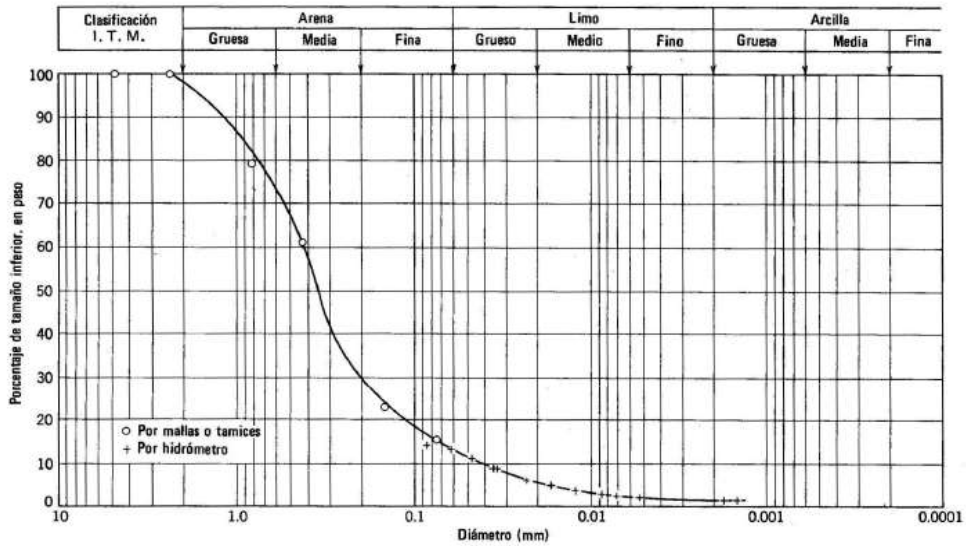


Figura 15. Curva granulométrica de un suelo (Según Lambe, 1951).

Fuente: Lambe, 1951.

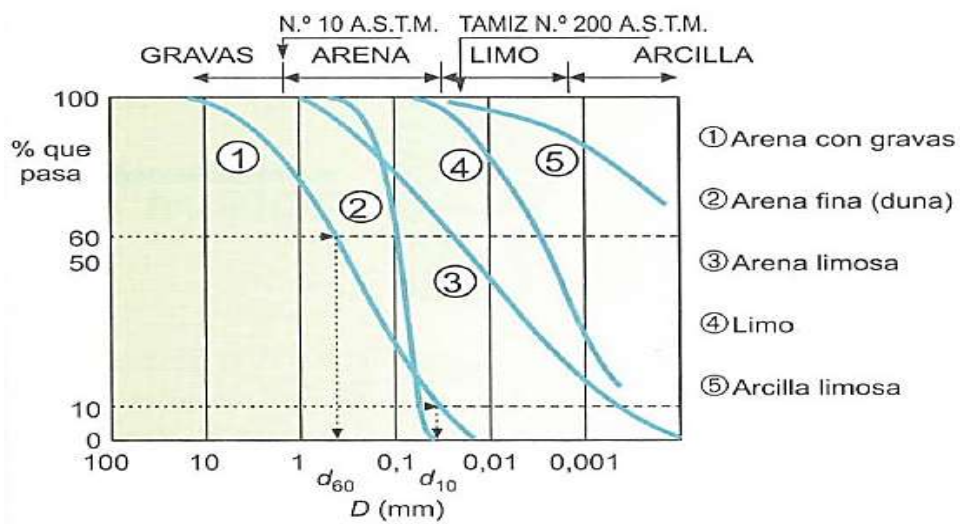


Figura 16. Curvas granulométricas

Fuente: Muelas s.f.

d. Plasticidad

Cuando un suelo arcilloso se mezcla con una cantidad excesiva de agua, éste puede fluir como un semilíquido. Si el suelo se seca gradualmente,

se comportará como un material plástico, semisólido o sólido, dependiendo de su contenido de agua (Das, 2001).

Los contenidos de humedad y los puntos de transición de unos estados a otros se denominan Límites de Atterberg (Lambe & Whitman, 1995). El concepto de que un suelo puede presentarse en varios estados, en función del contenido de humedad, se basa en que cuanto mayor sea la cantidad de agua que contiene un suelo, menor será la interacción entre partículas adyacentes y más se aproximará el comportamiento del suelo al de un líquido (Jara, 2014).

"Esta variación de la consistencia en función de la humedad (a la que se conoce como plasticidad) es propia de suelos finos (arcillas y limos), ya que los suelos gruesos (arenas y gravas) no retienen agua y se mantienen inalterables en presencia de ésta" (Jara, 2014).

La determinación de los Límites de Atterberg se lleva a cabo en laboratorio, definiéndose el límite plástico como el contenido de agua con el cual el suelo se agrieta al formarse un rollito de 3 mm de diámetro. El límite líquido del suelo, se determina utilizando la copa de Casagrande (Designación de Prueba D -4318 de la ASTM) (Das, 2001).

El significado físico de los límites de Atterberg y su utilización práctica se considerará en el Informe Final de Tesis.

Según Das (2001), la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo se define como Índice de Plasticidad:

$$IP = LL - LP$$

El índice de liquidez o fluidez se define como:

$$I_L = \frac{W_n - W_p}{W_L - W_p}$$

El índice de plasticidad indica la magnitud del intervalo de humedades en el cual el suelo posee consistencia plástica, mientras que el índice de

liquidez indica la proximidad de la humedad natural del suelo al límite líquido (Lambe & Whitman, 1995).

Con el fin de proporcionar una representación adecuada de la plasticidad de una muestra de suelo se emplea la denominada Carta de Plasticidad de Casagrande (Muelas, s.f.). La Carta de Plasticidad y la tabla de clasificación SUCS se presentarán en el Informe Final de Tesis.

Muelas (s.f.), indica que, en el gráfico "Carta de Plasticidad de Casagrande", se representa la relación del límite líquido (abscisas) con el índice de plasticidad (ordenadas). Casagrande definió que los suelos con $LL > 50$ son de "alta plasticidad" (pueden admitir un mayor contenido de agua y por tanto pueden experimentar deformaciones plásticas mayores). Los suelos con $LL < 50$ se denominan de "baja plasticidad". Complementariamente, el Ing. Casagrande, definió una línea A, que separa los suelos arcillosos de los más limosos. Así, a partir del criterio de alta y baja plasticidad y de la línea A, se pueden definir varias zonas en el gráfico anterior. Los suelos limosos y con apreciable contenido orgánico tienen un intervalo de humedad menor para pasar del estado semisólido al estado líquido (menor índice de plasticidad), situándose por debajo de la línea A.

En el caso de las arcillas, dicho intervalo de humedad es mayor, situándose por encima de la línea A. Se definen, por tanto, varios tipos de suelos: arcillas de alta plasticidad (CH), arcillas de baja plasticidad (CL), limos y suelos orgánicos de alta plasticidad (MH-OH) y limos y suelos orgánicos de baja plasticidad (ML-OL) (Muelas, s.f.).

e. Clasificación de suelos

Con el objeto de dividir los suelos en grupos de comportamiento semejante, con propiedades geotécnicas similares, surgen las denominadas clasificaciones de suelos. (Lambe, T.W. & Whitman, R, 1995).

La clasificación de suelos consiste, pues, en incluir un suelo en un grupo que presenta un comportamiento semejante. La correlación de unas ciertas propiedades con un grupo de un sistema de clasificación suele ser un proceso empírico puesto a punto a través de muchos años de experiencia. (Lambe, T.W. & Whitman, R, 1995).

La mayoría de las clasificaciones de suelos utilizan ensayos muy sencillos, para obtener las características del suelo necesarias para asignarlo a un determinado grupo (Lambe, T.W. & Whitman, R, 1995). Las propiedades ingenieriles básicas que suelen emplear las distintas clasificaciones son la distribución granulométrica, los Límites de Atterberg, el contenido en materia orgánica, etc. “La clasificación de suelos constituye una ayuda valiosa para el ingeniero, le da indicaciones generales, transformando de manera empírica los resultados de la experiencia de campo. Sin embargo, el ingeniero debe ser precavido al utilizar las clasificaciones de suelos. La resolución de problemas de flujo, asentamiento o estabilidad únicamente a partir de clasificaciones puede llevarle a resultados desastrosos”. (Lambe, T.W. & Whitman, R, 1995).

Muelas (s.f), indica que los dos sistemas principales de clasificación de suelos actualmente en uso son el sistema AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el SUCS (Unified Soil Classification System). El primero se usa principalmente para la evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material para la construcción de explanadas de canteras.

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) fue presentado por Arthur Casagrande como una modificación y adaptación más general a su “Sistema de clasificación de aeropuertos” propuesto inicialmente en 1942 para aeropuertos y después, en 1952, revisado por el Bureau of Reclamation de Estados Unidos y por el Cuerpo de Ingenieros.

Este sistema es el más extendido para la amplia variedad de problemas geotécnicos de ingeniería en los que intervienen suelos (permeabilidad,

resistencia y compresibilidad de diversos tipos de suelos de cada grupo para su empleo en presas de tierra, canales, cimentaciones y pistas de aeropuertos). (Muelas, s.f)

El sistema SUCS clasifica los suelos en base a su granulometría, los Límites de Atterberg y el contenido en materia orgánica. A continuación, se muestra dicha clasificación, junto con los símbolos empleados en la misma, así como una descripción de las propiedades esperables de los grupos diferenciados según Muelas, (s.f), abarca solo gravas, arenas, suelos limosos y arcillosos.

Tabla 9. Clasificación de los suelos en cuatro grandes grupos en función de su granulometría.

Tipo de Suelo	Descripción	Tamaño
Gravas	Los granos son observables directamente, existen grandes huecos entre las partículas y no retienen el agua.	80 mm. y 4,75 mm
Arenas	Estas son observables a simple vista y se mantienen inalterables en presencia de agua.	4,75 mm. y 0,075 mm
Limos	Retienen el agua y si se forma una pasta limo-agua y se coloca sobre la mano, al golpear con la mano se aprecia cómo el agua se exuda con facilidad.	0,075 mm y 0,002 mm
Arcillas	Son partículas de tamaño gel y están formadas por minerales silicatos, constituidos por cadenas de elementos tetraédricos y octaédricos, unidas por enlaces covalentes débiles y pudiendo entrar las moléculas de agua entre las cadenas, produciendo aumentos de volumen, a veces muy	Tamaños inferiores a 0,002 mm

	<p>importantes. Por tanto, presentan una gran capacidad de retención de agua, con un porcentaje de huecos muy elevado (huecos pequeños, pero con una gran superficie de absorción en las partículas). Debido a que el tamaño de los huecos es muy pequeño (aunque el índice de huecos es elevado), exhiben unos tiempos de expulsión de agua muy elevados y una permeabilidad muy baja (Muelas s.f.).</p>	
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Fuente: Crespo, 2007.

Tabla 10. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos.

Símbolo de grupo	Criterios
CL	Inorgánico; $LL < 50$; $PI > 7$; Límites de Atterberg sobre o arriba de la línea A (véase zona CL en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
ML	Inorgánico; $LL < 50$; $PI < 4$; Límites de Atterberg debajo de la línea A (véase zona ML en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
OL	Orgánico; (LL no secado en horno) / (LL secado en horno) < 0.75 ; $LL < 50$ (véase zona OL en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
CH	Inorgánico; $LL \geq 50$; PI sobre o arriba de la línea A (véase zona CH en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
MH	Inorgánico; $LL \geq 50$; PI debajo de la línea A (véase zona MH en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
OH	Orgánico; (LL no secado en horno) / (LL secado en horno) < 0.75 ; $LL \geq 50$ (véase zona OH en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)

CL-ML	Inorgánico; LL >50; 4≤PI≤7; Límites de Atterberg arriba de la línea A. Se grafica en la zona sombreada en la Carta de Plasticidad de Casa Grande)
-------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: (Das, 2001)

La clasificación AASHTO ASTM D 3282 – 94 se presentará en el Informe Final.

1.2.12. Propiedades físicas y químicas de las arcillas

Para entender mejor la respuesta que tendrán los suelos ante una estabilización es necesario conocer los aspectos físicos-químicos de éstos. De manera general se considera, que las partículas arcillosas tienen un tamaño del orden de las 2 micras (0.002 mm) o menores y presentan una actividad eléctrica importante que rige su comportamiento, dada su gran superficie específica en relación con su volumen, y aun con su masa.

En los suelos finos predominan las fuerzas eléctricas y están compuestos predominantemente por minerales cristalinos, algunos de los cuales tienen muy poca actividad superficial por lo que no contribuyen a los efectos conocidos como plasticidad y cohesión, como pueden ser el cuarzo y la calcita, por ejemplo. Por lo que, es imprescindible la clasificación de los suelos (SUCS, AASHTO), la determinación de la composición mineralógica del suelo y el material estabilizante y el análisis de los niveles de materia orgánica que contiene el suelo.

1.2.13. Propiedades de los suelos granulares

Los suelos clasificados dentro los grupos A-1, A-2 y A-3 según AASHTO o sus equivalentes según SUCS son materiales granulares de los cuales 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz N° 200.

Adopta el siguiente rango de tamaño de partículas:

- Cantos rodados. Son fragmentos de roca, usualmente redondeados por abrasión, que son retenidos en el tamiz de 3" (75 mm).
- Grava. Es la fracción que pasa el tamiz de 3" (75 mm) y es retenido en el tamiz N° 10 (2 mm).
- Arena. Es la fracción que pasa el tamiz N° 10 (2 mm) y es retenido en el tamiz N° 200 (0.075 mm).

El suelo granular no es plástico y no se puede determinar el Límite líquido, entonces el índice de grupo (IG) será: $IG = 0$. Este es el caso de los suelos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 y A-3, en donde su índice de grupo siempre es cero.

Aun utilizándose los valores del Índice de Grupo para comparar suelos dentro del mismo grupo y no entre grupos diferentes, los índices de grupo de los suelos granulares están generalmente comprendidos entre 0 y 4, los correspondientes a los suelos limosos, entre 8 y 12 y los suelos arcillosos, entre 11 y 20, o más; así por ejemplo, si se pueden comparar un suelo A-3 (0), con un suelo A-3 (3), donde por el valor del índice de grupo se puede deducir que el suelo A-3 (0) es de mejor calidad que el suelo A-3 (3), por tener este un valor del índice de grupo menor ($0 < 3$).

La ecuación empírica del índice de grupo diseñada para conseguir una evaluación aproximada de los suelos del mismo grupo, en los materiales granulares arcillosos, y los materiales limo arcillosos, se basa en las siguientes suposiciones:

- Los materiales que se encuentran en los grupos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 y A-3 son apropiados para su uso como subrasantes o si se encuentran conformando estratos a la profundidad

apropiada para implante de cimentación, cuando están adecuadamente drenados y compactados

- Los materiales granulares arcillosos de los grupos A-2-6 y A-2-7 y los materiales limosos y arcillosos de los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7, pueden clasificarse para su utilización como estratos para implante de cimentación, equivalentes a las categorías A-2-4 y A-2-5.
- Se supone que un 35% o más de material que pasa el tamiz N° 200 (0.0075 mm.) es crítico si se omite la plasticidad, pero el mínimo crítico es solo el 15% cuando se ve afectado por el IP mayor que 10. Se supone que el LL igual o mayor que 40% es crítico. Se supone que el IP igual o mayor que 10% es crítico.

1.2.14. Propiedades de los suelos residuales

“En el Perú, los suelos tropicales en un gran porcentaje son de tipo saprolíticos, esto es, suelos arcillosos mezclados con limo y arena, principalmente. Algunos resultados de ensayos de resistencia al cortante efectuadas en estos suelos indican valores muy dispersos; sin embargo, se ha encontrado que la prueba de la veleta practicada en los suelos saprolíticos que se encuentran muy fisurados, la medida de la resistencia al corte sin drenaje efectuada en el campo arroja siempre valores mucho más confiables que las ensayos de laboratorio, comprobándose que estos valores son mucho más altos en casi todos los casos que los obtenidos por otros medios, siendo el límite más bajo los resultados de los ensayos triaxiales rápidos y los más próximos los resultados de los ensayos de Compresión-No-Confinada, quizás debido a la descompresión que sufren estos suelos al ser obtenidos en profundidad y a la alteración de los especímenes con el manipuleo, o los efectos de la succión en los suelos parcialmente saturados que hacen variar su resistencia al cortante”. (Carrillo-Gil, 1978).” (Vásquez y Marín, 2020).

“Carrillo-Gill (2016), al tratar sobre la estabilización con cal de suelos residuales en la selva baja peruana, señaló: “De la investigación llevada a cabo con fines de estabilización con cal para algunos suelos saprolíticos de la amazonia peruana que permanentemente presentan contenidos, de humedad natural mucho mayores que el óptimo de compactación, se han encontrado algunos resultados de laboratorio para especímenes que presentan portancia tan baja como CBR de 1% a 5% en promedio, y que al mezclarse con cal se obtiene un aumento substancial en el valor del CBR para diferentes tiempos de curado, probablemente debido al desarrollo de la reacción puzolánica en el suelo, estableciéndose que con 5% a 6% de cal hidratada en peso es posible obtener un mínimo de 15% de CBR como resistencia inicial para las arcillas saprolíticas de la selva baja, y si se continua el curado, se encontró que después de un buen tiempo el CBR aumentó considerablemente llegando hasta valores mayores del 29% en 140 horas (Carrillo-Gil, et al, 1993) en (Vásquez y Marín, 2020).

1.2.15. Análisis de la materia orgánica

El ensayo de los niveles de contenido de materia orgánica que contiene un suelo se realiza por el método Walkley y Black. La materia orgánica es una mezcla heterogénea de sustancias de origen vegetal, animal y microbiana que, dentro del suelo, influyen sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas.

El método se basa en la oxidación por medio del Dicromato de Potasio que reacciona en un volumen con dos de Ácido Sulfúrico concentrado. El exceso de Dicromato de Potasio se determina valorando con solución de Sulfato Ferroso Amoniaco en presencia como indicador Difenilamina Sulfúrica.

Previamente a la determinación de materia orgánica se debe estar seguros que no existen sales de cloro ya que pueden ser la fuente de error, en caso que existan se deben eliminar las sales solubles antes de la determinación.

En la Tabla 11, se muestra los Niveles de Materia Orgánica.

Tabla 11. Niveles de Materia Orgánica

Niveles de contenido	Porcentaje de materia orgánica
Bajo	0 - 2
Medio	2 - 4
Alto	Más de 4

1.2.16. Exploración geotécnica

Los métodos de exploración de suelos convencionales son: Calicatas, Sondeos, Penetrómetros, Ensayos geofísicos. Los depósitos naturales que forman todo tipo de suelo son tan variados que ningún método de exploración es ideal para todos los casos; esto significa que cada suelo requerirá probablemente de un procedimiento para investigarlo muy diferente del que necesitará otro subsuelo. Antes de proceder a explorar el suelo, es conveniente un análisis y observación preliminar de la zona para tener una información que, en muchos casos, evitará investigaciones costosas e innecesarias (Graneros & Tito, 2017) (Quispilaya y Cruz, 2018).

Según la norma E.050 para la investigación de suelos, las edificaciones se clasifican en tres tipos siendo A más exigente que el B y este que el C.

Tabla 12. Tipo de edificación para investigación de suelos

Tipo de edificación					
Clase de estructura	Distancia mayor entre apoyos	Número de pisos (Incluido sótanos)			
Aporticada de concreto	<12	C	C	C	B
Pórticos y/o muros de concreto	<10	C	C	B	A
Muros portantes de albañilería	<12	B	A	-	-
Bases de máquinas y similares	cualquiera	A	-	-	-
Estructuras especiales	cualquiera	A	A	A	A
Otras estructuras	cualquiera	B	A	A	A
Cuando la distancia sobrepasa la indicada, se clasificará en el tipo de edificación					
Tanques elevados y similares	≤ 9m de altura	>9m de altura			
	B	A			

Fuente: Norma E.050

“Para definir el número de puntos de investigación del suelo, se toma en cuenta el tipo de edificación y el área de la superficie que ocupará esta edificación” (Quispilaya y Cruz, 2018).

Tabla 13. Número de puntos de investigación de suelo

Número de puntos de investigación	
Tipo de edificación	Número de puntos de investigación (n)
A	1 cada 225 m ²
B	1 cada 450 m ²
C	1 cada 800 m ²
Urbanizaciones para viviendas Unifamiliares de hasta 3 pisos	3 por cada hectárea de terreno habilitado

Fuente: Norma E. 050

1.2.17. Criterios para calificación de suelos con fines urbanos

“La descripción e identificación de los suelos es de suma importancia para que el ingeniero pueda determinar si un suelo es apto o no para la construcción, se debe tener en cuenta diversos criterios” (Quispilaya y Cruz, 2018).

a. Distribución granulométrica

“Los tamaños de las partículas en general que conforman un suelo, varían en un amplio rango, La granulometría se refiere al tamaño de los elementos que componen el suelo, el tamaño de las partículas del suelo influye directamente en las propiedades de este (Das, 2001, p.2)” (Quispilaya y Cruz, 2018)

b. Textura y color del suelo

“La textura se refiere al tamaño que prevalecen en el sedimento del suelo, es por eso que los suelos pueden clasificarse en función a estas proporciones de prevalencia en suelo gravoso (suelo con prevalencia de gruesos), suelo arenoso, suelo arcilloso (si prevalece el tamaño fino arcilla o limos), etc.; los suelos de textura gruesa tienen mayor capacidad de carga y de esta manera son mejores que los suelos con prevalencia de finos.

Según el color de los suelos se puede determinar la estabilidad de los mismos, son inestables los suelos de color negro, rojizo, amarillento y blanco, mientras que los de color gris son suelos más estables (PREDES, 2018)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

c. Consolidación del suelo

“Los suelos se consolidan con el tiempo y la exposición a fenómenos naturales, los suelos blandos son suelos sueltos y fáciles de excavar, son suelos no consolidados por lo tanto son de baja calidad para la edificación.

Los suelos firmes, compactos y consolidados serán suelos duros y difíciles de excavar, este tipo de suelos son buenos para la edificación” (Quispilaya y Cruz, 2018).

d. Grado de saturación del suelo y nivel freático

“La calidad del suelo se ve afectado por la cantidad de agua que contiene, ante la presencia de agua los suelos gruesos son más estables que los suelos finos. La capa freática es la capa de agua subterránea y su nivel puede variar durante el año dependiendo de la época de estiaje o de lluvia (Cobeñas, 2017)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

“Un suelo será malo si el nivel freático es superficial (a menos de 2 metros de profundidad desde la superficie del suelo) y será estable y bueno si el nivel freático es profundo” (Quispilaya y Cruz, 2018).

A continuación, se resume los criterios que se debe tomar en cuenta para calificar los suelos con fines urbanos:

Tabla 14. Criterios para identificar suelos aptos para construcción

Criterios utilizados	Suelo apto para construir	Suelo No apto para construir
Granulometría	Gruesas	Finas
Peso unitario	Pesado	Liviano
Nivel freático	Sin agua o profunda	Superficial
Material orgánico	Sin material orgánico	Con material orgánico
Colapsable	Estable	Colapsable
Color de suelo	Gris	Rojo, amarillo o blanco
Forma de partículas	Angulosas	Redondeadas
Pre consolidación	Compacto y firme	Blando o suelto
Plasticidad	No plástico	Plástico
Expansión	No expansivo	Expansivo
Dispersión	No dispersivo	Dispersivo

Fuente (Palacios, 2015)

1.2.18. El suelo como elemento estructural de soporte de estructuras

El suelo o terreno cumple un papel importante como elemento estructural de soporte de estructuras, por este motivo antes de iniciar la construcción de una edificación, es de vital importancia conocer el tipo de suelo donde se construirá esta, puesto que nos guiará a que las estructuras que se construyan se apoyen en suelos de características competentes, preferentemente en suelos gruesos por ser considerados más estables que suelos finos (suelos limosos, arcillosos, orgánicos) ante la presencia de agua, pues estos sufren alteraciones convirtiéndose en suelos problemáticos, no aptos para la construcción.

El diseño de los cimientos para todo tipo de edificación requiere de estudios para analizar la disposición de los materiales en el subsuelo, categorizarlo de acuerdo al desempeño geotécnico evaluando sus propiedades físico-mecánicas con la finalidad de conocer el estrato que va a ofrecer resistencia a las cargas o esfuerzos transmitidos por la estructura a la cimentación y se pueda determinar su comportamiento (Quispilaya y Cruz, 2018).

La falta de información al momento de ejecutar una obra de ingeniería civil puede desencadenar una serie de inconvenientes técnicos, estos daños se relacionan con la inestabilidad del suelo lo cual termina en asentamientos diferenciales, asentamientos y desplomos en estructuras desplantadas en suelos blandos (Quispilaya y Cruz, 2018).

La exploración del subsuelo por métodos directos conlleva el uso de varios recursos: económicos, por sus altos costos y tiempo prudente para la realización de los ensayos de laboratorio, por lo que es necesaria la búsqueda de otros métodos de exploración que sean rentables, fáciles de realizar y en un tiempo menor y con capacidad suficiente para dar solución a problemas de caracterización geotécnica, este es el caso del método de resistividad eléctrica. (Quispilaya y Cruz, 2018).

Ante esta realidad para lograr un crecimiento ordenado de las ciudades, para detectar suelos inestables, es de suma importancia para los ingenieros

civiles y población el conocimiento del tipo de suelo o terreno antes de iniciar cualquier tipo de construcción, es así que se requiere de métodos no convencionales alternativos que permitan conocer la calidad de los suelos y así determinar el tipo de construcción que se podrá cimentar en este.

Este método alternativo debe ser económicamente viable también y prudente en tiempo de obtención de resultados para así para alentar a la población a realizar mínimamente este tipo de estudio de suelos y así puedan conocer el tipo de construcción apropiada para el tipo de suelo existente. (Quispilaya y Cruz, 2018)

El método de resistividad eléctrica, puede constituir una herramienta importante en la determinación de las características geotécnicas del suelo (Quispilaya y Cruz, 2018), siendo así se podría contar con una metodología rápida, de costo bajo para la caracterización de suelos y posterior determinación de la profundidad de desplante y/o capa freática en lugares donde se pretende construir edificaciones (Quispilaya y Cruz, 2018).

1.2.19. Cimentaciones

Las cimentaciones transmiten al suelo las cargas que soporta la estructura; de modo general existen dos tipos de cimentaciones: superficiales y profundas. Las cimentaciones superficiales son aquellas que se apoyan en capas superficiales o poco profundas del suelo, por tener suficiente capacidad portante o por tratarse de construcciones de importancia secundaria y relativamente livianas, en particular son superficiales cuando en el cálculo de la cimentación se tiene en cuenta la resistencia del suelo debajo del nivel de apoyo; estas se clasifican en: Zapatas (Aisladas, corridas, combinadas) y Losas de cimentación (Fierro & Segarra, 2018)” (Quispilaya y Cruz, 2018). En tanto, las cimentaciones profundas devienen de un diseño y requerimiento especial a falta de capacidad portante del suelo o cuando la profundidad es un parámetro por necesidad arquitectónica, como es el caso de la construcción de sótanos.

1.2.20. Profundidad de Cimentaciones

La profundidad de cimentación “Df” debe estar ubicado en un estrato resistente, esta profundidad es la distancia vertical medida desde la superficie del terreno hasta el fondo o base de la cimentación, en forma amplia esta profundidad depende de la profundidad del estrato de suelo competente para soportar las cargas transmitidas por la cimentación, es decir la cimentación debe ser establecida en un estrato de suelo portante de resistencia y compresibilidad apropiadas para poder soportar las cargas sin que se presenten problemas de asentamientos excesivos ni tampoco fallas en la masa de suelo; los estratos que están debajo de esta profundidad de desplante o cimentación también deben tener suficiente resistencia y compresibilidad (Delgado, 2008).

Según la Norma Técnica E.050 para cimentaciones superficiales ($D_f/B \leq 5$), la profundidad mínima de cimentación será de 0.80m en el caso de zapatas y cimientos corridos. Así mismo la cimentación no deberá ser colocada en desmontes, rellenos no controlados, en suelo orgánico, turba, los cuales deben ser removidos en su totalidad antes de la construcción de la edificación.

La profundidad mínima a alcanzar “p” por cada punto de investigación de suelos será mínimo 3 m, excepto si se encuentra roca. Para cimentaciones superficiales la profundidad mínima se determina por las siguientes expresiones:

- a. Edificación sin sótano

- b. Edificación con sótano

Donde la profundidad de verificación “z” podrá ser 1 m como mínimo, si en el proceso de exploración de suelo se ubica el estrato resistente (Profundidad de cimentación). Normalmente esta profundidad de verificación es igual a 1.5 veces el ancho de la cimentación de mayor área prevista. La

distancia entre el nivel de piso terminado del sótano y la superficie del terreno natural se denota por la letra h (Quispilaya y Cruz, 2018).

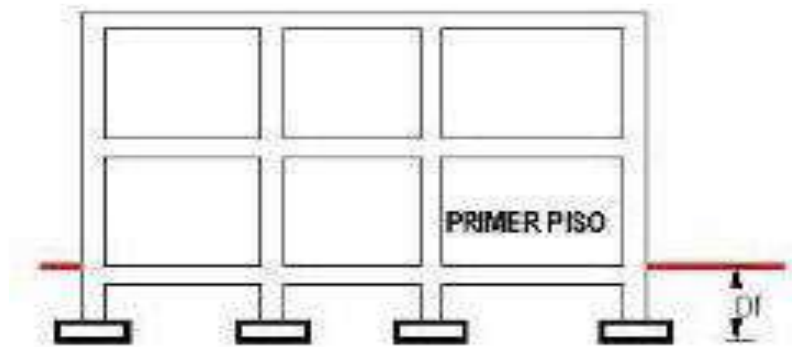


Figura 17. Profundidad de desplante.

Fuente: Norma E.050

1.2.21. Métodos de exploración de suelos con fines de cimentación

“La investigación o exploración del subsuelo consiste en determinar, tanto los estratos de depósitos que se encuentren debajo de una estructura, así como las propiedades físicas y mecánicas que presentan cada uno de estos estratos (Fierro & Segarra, 2018)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

La exploración del suelo consta de operaciones de campo y laboratorio, existen diversos métodos exploratorios sin embargo ningún método es el adecuado para todos los casos, entre estos tenemos a manera general los siguientes:

“**Calicatas:** son pozos a cielo abierto y permite la exploración in situ, se examinan los diferentes estratos llevando un registro completo y detallado de las condiciones del mismo como son el color, textura, espesores, humedad. En este método se hace una observación visual directa y da la posibilidad de tomar muestras de suelo ya sean alteradas o inalteradas, sin embargo, están limitadas por la profundidad. Se debe tener presente que al realizar la excavación se alteran las condiciones naturales del terreno, por lo tanto, la ubicación de los cimientos debe realizarse en otro punto diferente al

de la calicata para evitar que estos se apoyen en terrenos removidos. Las calicatas son indicadas para terrenos duros, y recomendables para edificaciones pequeñas en terrenos homogéneos (Chavarria, 2017)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

“**Sondeos:** es un ensayo in situ y consta de perforaciones de pequeño diámetro que, aunque no sea posible la visión in situ del terreno, podemos obtener testigos de suelo perforado. Los sondeos pueden ser manuales o mecánicos y se emplean para alcanzar profundidades superiores a las calicatas (Chavarria, 2017)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

“**Penetrómetros:** estos pueden ser estáticos (se inca por la presión de un tornillo sin fin) y dinámicos (se inca por una serie de golpes de una masa) y dan un registro continuo de la resistencia del terreno (Chavarria, 2017)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

“**Métodos geofísicos:** se emplearon inicialmente en la exploración del suelo con fines geológicos, determinación de aguas subterráneas, minerales, etc; sin embargo, poco a poco están siendo adaptados a las necesidades de la ingeniería civil.

Estos métodos geofísicos mediante un parámetro físico como por ejemplo en sísmica por la velocidad de transmisión de las ondas o en geolétrica por la resistividad, intentan reconocer formaciones geológicas que se encuentran en profundidad. Existen diversas técnicas geofísicas que miden la resistividad de los materiales, siendo unas más modernas y precisas que otras (Arias, 2011)” (Quispilaya y Cruz, 2018).

Finalmente, ha de tenerse también en cuenta que existe una relación directa entre humedad, temperatura y salinidad respecto a resistividad, mientras que esta relación es inversa entre porosidad y resistividad. (Tabla 15).

Tabla 15. Relación de resistividad con características del suelo

Aumento de	Resistividad
Porosidad	Aumenta
Salinidad	Baja
Humedad	Baja
Temperatura	Baja

1.3. Definición de términos básicos

Carga eléctrica: Propiedad eléctrica de las partículas atómicas de las que se compone la materia, se mide en Coulombs C (Alexander & Sadiku, 2013, p.5).

Corriente eléctrica: Velocidad de cambio de la carga respecto al tiempo, medida en Amperes A (Alexander & Sadiku, 2013, p.5).

Isotropía: Propiedad de los cuerpos de que alguna magnitud física sea la misma en todas las direcciones, la resistividad de las rocas depende de la dirección que se considere es decir presentan un comportamiento anisótropo (Iakubovskii & Liajov, 1980).

Electrodo: Elemento conductor eléctrico en forma de varilla que generalmente es de acero bañado en cobre que se utiliza para la inyección de corriente al suelo y medición de diferencia de potencial (Iakubovskii & Liajov, 1980).

Dieléctrico: Material que tiene una alta resistividad eléctrica o que tiene una muy baja conductividad eléctrica pues este no posee ninguna carga eléctrica libre como los que se encuentran en los conductores (Alexander & Sadiku, 2013).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Descripción del problema

El suelo o terreno cumple un papel importante como elemento estructural de soporte de estructuras, por este motivo antes de iniciar la construcción de una edificación, es de vital importancia conocer el tipo de suelo donde se construirá esta, puesto que nos guiará a que las estructuras que se construyan se apoyen en suelos de características competentes, preferentemente en suelos gruesos por ser considerados más estables que suelos finos (suelos limosos, arcillosos, orgánicos) ante la presencia de agua, pues estos sufren alteraciones convirtiéndose en suelos problemáticos, no aptos para la construcción.

El diseño de los cimientos para todo tipo de edificación requiere de estudios para analizar la disposición de los materiales en el subsuelo, categorizarlo de acuerdo al desempeño geotécnico evaluando sus propiedades físico-mecánicas con la finalidad de conocer el estrato que va a ofrecer resistencia a las cargas o esfuerzos transmitidos por la estructura a la cimentación y se pueda determinar su comportamiento.

La falta de información al momento de ejecutar una obra de ingeniería civil puede desencadenar una serie de inconvenientes técnicos, estos daños se relacionan con la inestabilidad del suelo lo cual termina en asentamientos diferenciales, asentamientos y desplomos en estructuras desplantadas en suelos blandos.

La exploración del subsuelo por métodos directos conlleva el uso de varios recursos: económicos, por sus altos costos y tiempo prudente para la realización de los ensayos de laboratorio, por lo que es necesaria la búsqueda de otros métodos de exploración que sean rentables, fáciles de realizar y en un tiempo menor y con capacidad suficiente para dar solución a problemas de caracterización geotécnica, este es el caso del método de resistividad eléctrica.

Ante esta realidad para lograr un crecimiento ordenado de las ciudades, para detectar suelos inestables, es de suma importancia para los ingenieros civiles y población el conocimiento del tipo de suelo o terreno antes de iniciar cualquier tipo de construcción, es así que se requiere de métodos no convencionales alternativos que permitan conocer la calidad de los suelos y así determinar el tipo de construcción que se podrá cimentar en este. Este método alternativo debe ser económicamente viable también y prudente en tiempo de obtención de resultados para así para alentar a la población a realizar mínimamente este tipo de estudio de suelos y así puedan conocer el tipo de construcción apropiada para el tipo de suelo existente.

El presente estudio pretende demostrar que el método de resistividad eléctrica, puede constituir una herramienta importante en la determinación de las características geotécnicas del suelo.

Por ello con el fin que se pueda contar con una metodología rápida, de costo bajo para la caracterización de suelos y posterior determinación de la profundidad de desplante y/o capa freática en lugares donde se pretende construir edificaciones hemos elaborado el presente estudio.

2.2. Formulación del problema

2.2.1. Problema general

¿Cómo determinar, a través de los valores de resistividad eléctrica del terreno, las características físicas y mecánicas del suelo de emplazamiento de la estructura de la Institución Educativa N° 60778, Comunidad de Nina Rumi, distrito de San Juan Bautista, ¿provincia de Maynas?

2.2.2. Problemas específicos

1. ¿Es posible, a través de los valores de resistividad eléctrica, obtener una relación entre un corte geoelectrico y geológico del terreno en la fundación estructural del local de la Institución Educativa N° 60778, Comunidad de Nina Rumi, distrito de San Juan Bautista, ¿provincia de Maynas?
2. ¿Es posible lograr una correlación satisfactoria entre los resultados de resistividad eléctrica y los valores de las propiedades físicas y mecánicas del suelo obtenidas a través de estudios geotécnicos y de la Mecánica de Suelos?
3. ¿En qué medida resulta ventajoso el uso de mediciones de resistividad eléctrica frente a los métodos geotécnicos convencionales de caracterización de suelos?

2.1.3. Objetivos

2.1.3.1. Objetivo general

Efectuar mediciones de resistividad eléctrica en el terreno de emplazamiento de la Institución Educativa N° 60778 utilizando el Método de Wenner, determinar la relación existente entre el corte geoelectrico y geológico, analizar las características del suelo; y, comparar los resultados con los obtenidos a partir de ensayos de la Mecánica de Suelos.

2.1.3.2. Objetivos específicos

1. Obtener un corte geoelectrico y geológico del suelo a partir de los valores de resistividad eléctrica obtenidos mediante la aplicación del método de Wenner en el terreno de fundación de la Institución Educativa N° 60778.
2. Obtener una correlación entre los resultados del Estudio de Mecánica de Suelos existente y los resultados obtenidos del empleo del Método de Wenner de resistividad eléctrica aplicado en el terreno de fundación de la Institución Educativa N° 60778.
3. Comparar en tiempos y costos de ejecución la obtención de resultados tanto del Método de Wenner de resistividad eléctrica y el Método convencional de la Mecánica de Suelos para determinación de características físicas y mecánicas del suelo.

2.1.4. Hipótesis

2.1.4.1. Hipótesis general

H: Los valores de resistividad eléctrica determinados a partir de mediciones en el terreno de fundación de la Institución Educativa N° 60778 utilizando el Método de Wenner, tienen alto nivel de correlación con el espesor de los estratos y las características físicas y mecánicas del suelo en este entorno.

2.1.4.2. Hipótesis específicas

H1: Los valores de resistividad eléctrica obtenidos mediante la aplicación del método de Wenner en el terreno de fundación de la Institución Educativa N° 60778 permiten asociar el corte geoelectrico y el corte geológico en esta área de terreno correspondiente.

H2: Existe una correlación entre los resultados del Estudio de Mecánica de Suelos existente y los resultados obtenidos del empleo del Método de Wenner de resistividad eléctrica aplicado en el terreno de fundación de la Institución Educativa N° 60778.

H3: Los tiempos y costos de determinación de las características físicas y mecánicas del suelo aplicando el Método de Wenner de resistividad eléctrica son menores que los empleados para su determinación por el Método Convencional de la Mecánica de Suelos.

2.2. Variables

2.2.3. Identificación de variables

- **Variable independiente X:**

X: Resistividad Óhmica del suelo

- **Variable dependiente Y:**

Y: Espesor de los estratos y características físicas y del suelo

- **Variable Interviniente Z:**

Z: Propiedades mecánicas del suelo de fundación de la institución educativa N° 60778

2.2.4. Definición conceptual y operacional de variables

2.2.4.1. Definición conceptual de variables

- **Variable independiente X:** Resistividad del suelo se define como la resistencia que ofrece un cubo de 1 m de lado (lleno con el suelo que se desea analizar) al paso de la corriente (Moreno, Valencia, Cárdenas & Villa, 2007). Su valor describe el comportamiento de un material frente al paso de una corriente eléctrica, por lo que nos da una idea de lo buen o mal conductor que es; será un mal conductor si tiene un valor alto de resistividad, mientras que un valor bajo de la resistividad indicará que el material es un buen conductor.
- **Variable dependiente Y:** Características físicas del suelo de la institución educativa N° 60778
- **Variable Interviniente Z:** Propiedades mecánicas del suelo de fundación de la institución educativa N° 60778.

2.2.4.2. Definición operacional de variables

Tabla 16. Operacionalización de Variables

Variables	Indicadores genéricos	Instrumentos
Variable Independiente X: Resistividad óhmica del terreno de la Institución Educativa N° 60778	Valores de resistividad eléctrica	Instrumento de toma de datos. Valores de resistividad del terreno. Diagnóstico. Informe de evaluación
Variable Dependiente Y:	-Espesor de estrato	Planos.

Características físicas del suelo	-Clasificación del suelo década estrato. -Características físicas del suelo de fundación	Expediente técnico. Memoria de cálculo
Variable Interviniente Z: Propiedades mecánicas del suelo de fundación de la Institución Educativa N° 60778	Aproximación de valores de esfuerzos del suelo de fundación.	Valores de esfuerzos

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de la investigación

3.1.1. Tipo de investigación

La investigación será No Experimental, de tipo descriptivo comparativo. A continuación, se detalla:

Tabla 17. Tipo de investigación

Criterio	Tipo de Investigación
Finalidad	Aplicada
Estrategia o enfoque teórico metodológico	Cuantitativa
Objetivo (alcances)	Descriptiva
Fuente de datos	Primaria
Diseño de prueba de hipótesis	No experimental
Temporalidad	Transversal
Contexto donde se desarrolla	Campo (zona rural Loreto) y gabinete
Intervención disciplinaria	Multidisciplinaria

3.1.2. Diseño de la investigación

Su diseño corresponde al tipo no experimental.

Esquema:



Donde:

M: Muestra

O: Observaciones

Figura 10: Diseño de Investigación

Realizar la observación a cada variable en forma independiente y describirlas (medir cada variable independientemente).

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

Corresponde a los suelos con fines de capacidad portante del distrito de San Juan Bautista, provincia de Maynas.

3.2.2. Muestra

La muestra está conformada por el suelo de fundación de fundación de la institución educativa N° 60778, distrito de San Juan Bautista, provincia de Maynas.

3.3. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos

3.3.1. Técnicas

Para desarrollar la presente investigación se aplicó como técnica la Observación y análisis documental; y, como su instrumento el cuestionario y las fichas de análisis de las referencias bibliográficas. Se utilizó la técnica de observación visual con los instrumentos de recolección de datos en la muestra, como paso fundamental, luego la identificación, clasificación, posterior análisis y evaluación de cada una de las propiedades físicas del terreno de fundación de la institución educativa N° 60778, distrito de San Juan Bautista, provincia de Maynas.

Se hizo una revisión y análisis documental para proveer de base teórica y técnica a los procedimientos y herramientas existentes en la literatura y otros generados como propuesta. El análisis documental incluye diversas tesis doctorales y artículos científicos de publicación reciente.

3.3.2. Instrumentos

Se utilizó: Lista de cotejo, las fichas de análisis documental de las referencias bibliográficas; cuadros de datos estadísticos, y otros formatos del Manual de Ensayos de Materiales; asimismo, formatos (Laboratorio de Mecánica de Suelos y Tecnología de Materiales de la Universidad Científica del Perú y estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación presentados como parte del Expediente Técnico y el de verificación por parte del Contratista ejecutor de la obra, ambos realizados en laboratorios privados.

Los instrumentos: Guía de Observación, Lista de cotejo, formatos y cuadros de datos estadísticos.

Los equipos se utilizaron fueron:

- GPS
- Equipos de cómputo
- Cámaras fotográficas
- Celulares de alta gama
- Equipos: Megger Nilsson, Metrawatt o similar
- Cinta métrica de material eléctricamente aislante
- Juego de 4 electrodos
- Juego de 4 cables (conductores aislados flexibles para la conexión de los electrodos al aparato de medición)
- Martillo de 2 kg
- Agua

3.3.3. Procedimientos de recolección de datos

- Se implementó la investigación con los insumos e instrumentos adecuados
- Se elaboró los instrumentos de recolección de datos.
- Se efectuó la toma de datos y recojo de información preliminar. Para la sistematización de los datos se usó los paquetes básicos de Microsoft, (Word, Excel); y, AUTOCAD.
Para llevar a cabo las mediciones de campo y obtener la resistividad aparente del terreno en estudio, se cumplió los siguientes pasos:
 - Delimitación de la zona en estudio
 - Marcación de un punto O que será el punto de simetrías para la ubicación de los electrodos de medición “a”.
 - Establecimiento de las direcciones de medición, tratando de cubrir totalmente el área en estudio
 - Selección de las distancias inter electródicas, para el dispositivo Wenner “a”.
 - Recolección de lecturas del resistivímetro.

Consideraciones en la medición usando el resistivímetro

a) Prueba

- Los electrodos fueron bien alineados y estuvieron igualmente espaciados
- Los electrodos fueron clavados en el suelo a la misma profundidad de 0.30m. Se tuvo presente que la profundidad a la que se está midiendo (1m separación = 70% de profundidad).
- El equipo fue posicionado simétricamente con respecto a los electrodos.
- Los electrodos fueron limpiados, retirándose algunas trazas de óxido.
- Se anotó la condición de humedad del suelo

b) Seguridad

- Se previó condiciones atmosféricas óptimas (cielo despejado y periodo de ausencia de lluvias).
- Las baterías del equipo estuvieron con el 100% de carga
- El responsable de las lecturas y manejo del equipo durante todo el periodo de medición estaba con calzado dieléctrico.

Para llevar a cabo las mediciones de campo y obtener con fines de verificación de resultados de las propiedades físicas del suelo, se efectuó dos calicatas de 1.00m x 1.00m de hasta tres (3.00m) de profundidad, extrayéndose muestras alteradas.

De la información secundaria se tomó en cuenta los estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación, elaborados por “Ingeniería y Consultor Herrera” y por “GEO CONCRET”, se cumplió los siguientes pasos:

3.4. Procesamiento para el análisis de datos

Los datos obtenidos de la observación directa del suelo materia de investigación, y de las fichas de referencias bibliográficas fueron procesados mediante gráficos y tablas elaborados en el programa Microsoft Excel. Para su presentación y análisis de la información resultante se usó los paquetes básicos de Microsoft, (Word, Excel); y, AUTOCAD.

- Para procesar la información proveniente de los ensayos de granulometría, contenido de humedad y otros para la clasificación de suelos por el sistema SUCS, se usó el paquete de Microsoft EXCEL y Word y registro fotográfico.
- Para el análisis estadístico e interpretación de los resultados, se empleó la estadística descriptiva, conformada por las frecuencias, promedio, porcentajes, desviación estándar y varianza y el uso del paquete estadístico Microsoft EXCEL.

La información fue procesada en forma computarizada utilizando cuadros estadísticos, distribución de frecuencias según las variables a estudiar y los cruces de información estudiados, mediante el uso del Excel, cumpliéndose con el siguiente proceso:

- Verificación y procesamiento inicial de los datos.
- Cálculo de la resistividad aparente de acuerdo a la fórmula pertinente.
- Levantamiento de la curva de resistividad respectiva
- Cuando existieron puntos donde la lectura era dudosa se repitió la medición respectiva.

Para hacer el modelamiento a dos (2) capas si bien se pudo usar el Modelo matemático usando el método de Wenner, se usó el Método de Curvas. Sin embargo, a continuación, se ilustra ambos métodos:

Modelo matemático

$$V_p = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right]$$

Donde:

V_p : Potencial de un punto p cualquiera de la primera capa respecto al infinito

ρ_1 : Resistividad de la primera capa

h : Profundidad de la primera capa

r : Distancias del punto p a la fuente de corriente

k : Coeficiente de reflexión

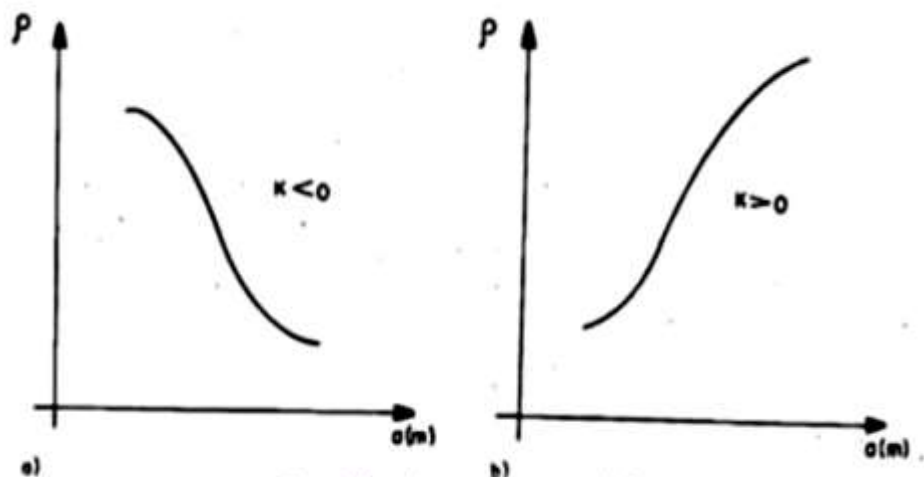
$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1}$$

La variación del coeficiente de reflexión está limitada entre -1 y +1

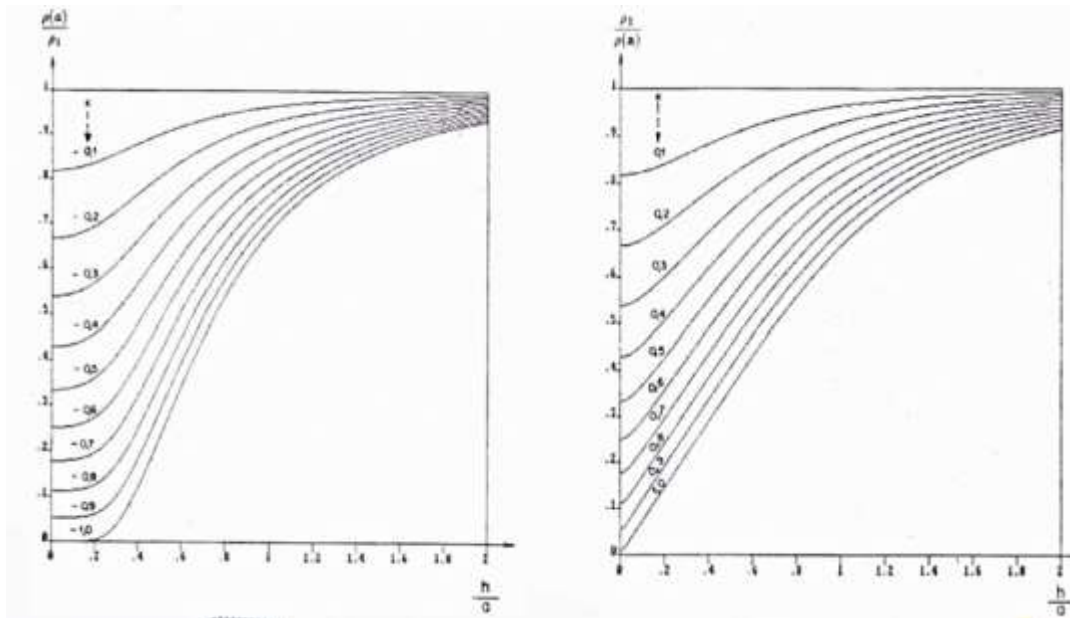
$$-1 \leq K \leq +1$$

Método de Curvas

El rango de variación del coeficiente de reflexión K es pequeño, y está limitado entre -1 y +1. Se trazó entonces, una familia de curvas de $\rho(a)/\rho_1$ en función de h/a para una serie de valores de K negativos y positivos, cubriendo toda su gama de variación. Se identificó la curva característica



Familia de curvas teóricas



Para el *modelamiento a dos capas*, se cumplieron los siguientes nueve (9) pasos:

Paso 1: Elaborar la curva en el plano X-Y con los valores de **espaciamiento** en el eje X y los valores de resistividad en el eje Y

Paso 2: Proyectar la curva elaborada en el paso anterior hasta cortar al eje **ρ_a** para determinar el valor **ρ_1** .

Paso 3: Escoger un valor de la medición “espaciamiento – resistividad”

Paso 4: Cálculo de la relación **ρ vs a**

Paso 5: Proyección y elaboración de tabla: $\frac{\rho a}{\rho_1}$ vs $\frac{h}{a}$, con lo cual se consigue **h [m]**.

Paso 6: Cálculo de la relación **espaciamiento – resistividad** con otra separación.

Paso 7: Proyección y elaboración de tabla con nueva separación.

Paso 8: Trazado de curvas de altura

Paso 9: Cálculo de p_2

Calicatas de sondaje de espesor de estratos y tipo de suelo efectuados por los investigadores:

De las muestras de suelos de cada uno de los estratos de las dos (2) calicatas se efectuó su clasificación según SUCS y AASHTO, así como se elaboró los perfiles estratigráficos correspondientes, cumpliéndose los siguientes pasos:

- Contenido de humedad natural (ASTM D 2216).
- Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D 422)
- Límites de consistencia (ASTM D 4318)
- Clasificación de suelos mediante los sistemas SUCS y AASHTO
- Elaboración de perfil estratigráfico
- Evaluación de nivel freático

El tipo de cimentación y la capacidad admisible del suelo de fundación, así como el asentamiento teórico probable ha sido aproximado tomando en cuenta los resultados de los dos estudios en mención (Información secundaria).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Coordenadas y resistividad

Tabla 18. Cuadro de coordenadas UTM, Sistema WGS-84 Zona 18L

CUADRO DE COORDENADAS UTM, SISTEMA WGS-84 ZONA 18L			
PUNTOS	ESTE	NORTE	COTA (msnm)
1	679175	9574875	107
2	679102	9574881	107
3	679146	9574905	107
4	679129	9574942	105
5	679187	9574942	101

Tabla 19. Resistividad aparente para cada separación de electrodos

RESISTIVIDAD APARENTE PARA CADA SEPARACIÓN DE ELECTRODOS				
Punto de estudio	Resistencia R (Ω)	Distancia Separación a(m)	Profundidad b(m)	Resistividad $\rho(\Omega.m)$
P-1	2.6	1,00	0.20	25.93
	1.1	2,00	0.20	16.30
	1.4	3,00	0.20	28.6
P-2	0.5	1,00	0.20	4.98
	0.1	2,00	0.20	1.48
	0.4	3,00	0.20	8.17
P-3	1.3	1,00	0.20	12.97
	0.3	2,00	0.20	4.45
	0.2	3,00	0.20	4.09
P-4	0.2	1,00	0.20	1.99
	0.4	2,00	0.20	5.93
	0.2	3,00	0.20	4.09
P-5	3.7	1,00	0.20	36.91
	1.3	2,00	0.20	19.27
	0.4	3,00	0.20	8.17

Aplicación directa de la fórmula

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

Donde:

a= Distancia entre

Electrodos

ρ= Profundidad Clavado

de Electrodo

4.1.1. Clasificación del suelo según SUCS y AASHTO

Tabla 20. Calicata C-1. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia

N° Muestra	Profundidad [m]	% de Humedad ASTM D-2216	Análisis Granulométrico ASTM D-422 NTP 339.128	L.L. ASTM D 4318-T89	LP ASTM D4318-T90	IP
M-1	0.00 – 0.50	28.13	% que pasa la malla N° es de 62.16%	49.83	26.51	23.32
Clasificación SUCS: (CL)						
Clasificación AASHTO: A-7-6 (11)						
Observaciones: Arcilla inorgánica, de color marrón claro, húmeda; porcentaje apreciable de partículas finas, de baja plasticidad, presencia de raíces.						

Tabla 21. Calicata C-1. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia

N° Muestra	Profundidad [m]	% de Humedad ASTM D-2216	Análisis Granulométrico ASTM D-422 NTP 339.128	L.L. ASTM D 4318-T89	LP ASTM D4318-T90	IP
M-2	0.50 – 2.50	33.55	% que pasa la malla N° 200 es de 90.64%	59.78	28.95	30.83
Clasificación SUCS: (CH)						
Clasificación AASHTO: A-7-6 (20)						
Observaciones: Arcilla inorgánica, de color gris con matices rojizos, húmeda; porcentaje apreciable de partículas finas, de alta plasticidad.						

Tabla 22. Calicata C-2. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia

N° Muestra	Profundidad [m]	% de Humedad ASTM D-2216	Análisis Granulométrico ASTM D-422 NTP 339.128	L.L. ASTM D 4318-T89	LP ASTM D4318-T90	IP
M-1	0.00 – 0.50	28.91	% que pasa la malla N° es de 69.33%	49.94	25.89	24.05
Clasificación SUCS: (CL)						
Clasificación AASHTO: A-7-6 (13)						
Observaciones: Arcilla inorgánica, de color marrón claro, húmeda; porcentaje apreciable de partículas finas, de baja plasticidad, presencia de raíces.						

Tabla 23. Calicata C-2. % de Humedad Natural, % pasa la N° 200 y Límites de Consistencia

N° Muestra	Profundidad [m]	% de Humedad ASTM D-2216	Análisis Granulométrico ASTM D-422 NTP 339.128	L.L. ASTM D 4318-T89	LP ASTM D4318-T90	IP
M-2	0.50 – 2.50	32.67	% que pasa la malla N° 200 es de 90.80%	56.17	26.46	29.71
Clasificación SUCS: (CH)						
Clasificación AASHTO: A-7-6 (19)						
Observaciones: Arcilla inorgánica, de color gris con matices rojizos, húmeda; porcentaje apreciable de partículas finas, de alta plasticidad.						

4.1.2. Clasificación de suelo según parámetros de Resistividad Eléctrica

Los datos obtenidos, fueron procesados y analizados gráficamente; y no se usó el programa IPI2WIN. Las lecturas de resistividad y su compatibilización con los nomogramas utilizados nos dieron un modelo que indica la presencia de dos estratos con su respectiva resistividad, en la figura correspondiente se muestra todas las lecturas de resistividad obtenidas en el campo, y la curva de resistividad aparente.

Para el SEV1 se observa la curva de resistividades y valores “ ρ ” de resistividad de cada estrato, su espesor “d” y su profundidad tope “h”. El primer estrato tiene un espesor de 0,50 m y una resistividad de 378 Ω .m que según la tabla 7 representaría una arena.

El segundo estrato de $5,2 \Omega.m$ y espesor de $3,75 m$ representa una arcilla; finalmente el tercer estrato con $676 \Omega.m$ representa una arena. El espesor del tercer estrato es infinito sin embargo debido a que en la superficie la separación entre electrodo de corriente y potencial (distancia a) es igual a $8 m$, entonces según el método Wenner los resultados son válidos hasta una profundidad de investigación z de $4,15 m$ ($z = a \cdot 0.519$); de esta forma se obtuvo el corte geoelectrico y geológico de cada punto de sondeo.

En los anexos 2 y 3, se encuentran las curvas de resistividad aparente, los datos de campo, la resistividad y espesor de cada estrato por cada sondeo eléctrico realizado. En la tabla correspondiente se encuentra el resumen del análisis para todos los puntos de investigación y sus correspondientes cortes geoelectricos – geológicos de los estratos resistentes.

Teniendo presente la norma E.050 que indica la profundidad de desplante para cimentaciones debe ser mayor a $0.80m$, hemos calculado una profundidad de desplante promedio igual a $1,90 m$ para todos los puntos de investigación.

Los resultados del laboratorio de mecánica de suelos “Cantera Geotecnia, construcción y minería” fueron los siguientes:

- Con los datos del laboratorio de suelo y los modelos de suelo o cortes geoelectricos - geológico, mediante cotejo directo se obtuvo una y correlación estratigráfica y de clasificación de suelos de ambos métodos. En la figura correspondiente se observa la correlación directa para el sondeo eléctrico vertical N° 1 y los resultados de laboratorio de suelos para la calicata a cielo abierto N° 1. En la Tabla se observa la correlación de clasificación de suelos entre ambos métodos para todos los puntos de investigación. En cuanto al espesor en comparación con el perfil estratigráfico se obtuvo un margen de error para cada punto de

exploración, el margen de variación en general obtenido fue del 9%.

De acuerdo a estos resultados de clasificación de suelos, perfil estratigráfico y localización de profundidad de desplante entre el método de resistividad eléctrica (geoeléctrico) y el método convencional (geotécnico), podemos decir que existe una alta correlación entre ambos métodos y los resultados difieren por un margen pequeño.

El costo directo promedio del mercado obtenido después de analizar las diferentes propuestas económicas emitidas por las diferentes empresas especialistas en estudio de suelos a la fecha de la presente investigación es de 1200 soles (calicata, perfilaje, análisis granulométrico por tamizado y límites Atterberg para clasificación de suelos) por cada calicata.

Por su parte el estudio geoeléctrico del suelo después del análisis de costos unitarios realizado es de 127 soles por punto de sondeo; sin embargo en realidad si solo se va a campo para realizar un solo sondeo se tendrá tiempo perdido de toda la cuadrilla, por lo que el costo real para un sondeo de un estudio geoeléctrico será de 511,32 soles que es el costo de un estudio de resistividad en el mercado según se puede apreciar en el anexo 5.

En lo que respecta al personal requerido para la realización de ambos métodos señalamos que se requiere 5 personas para el estudio de suelos convencional, mientras que se requiere de 3 personas para la realización de un estudio geoeléctrico, lo cual lógicamente esto repercute en los costos.

Respecto a los tiempos que se requieren desde el inicio de trabajos de exploración hasta la obtención de resultados del estudio de mecánica de suelos, estos tardaron normalmente entre 5 a 7 días aproximadamente, mientras que el tiempo necesario para un estudio geoeléctrico es de 4 horas o un día como máximo

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Nuestro modelo se refirió a dos estratos (dos capas de suelo) y el espesor de cada estrato se determinó gráficamente.

Las cinco series de mediciones de resistividad se efectuaron en las proximidades de las cinco calicatas que se habían practicado por Ingeniería y Consultor Herrera; asimismo, se practicaron dos calicatas donde en este estudio se había encontrado arcillas de alta plasticidad. En ambos casos los resultados a los que se arribó coinciden tanto en espesor como en calidad de suelos correspondientes a cada estrato de las cinco calicatas. A la vez se coincidió con los hallazgos de Geo Concret.

Según las lecturas de resistividad para la calicata 01, 02, 03 y 04 las lecturas estuvieron comprendidas entre 5.93 y 28.60, lo cual corresponde a suelos limo arcillosos de mediana plasticidad a arcillas limosas de baja plasticidad y limo arcilla arenosos de baja plasticidad.

Para la calicata 05 las lecturas estuvieron comprendidas entre 8.17 a 36.91, lo cual corresponde a arcillas inorgánicas de alta plasticidad.

Sin embargo, en la investigación de Quispilaya y Cruz (2018), los datos obtenidos, fueron procesados y analizados con el programa IPI2WIN, para el SEV1 para un modelo que indica la presencia de tres estratos con su respectiva resistividad. Siendo su primer estrato de un espesor de 1.56m y una resistividad de 378 Ω .m que según la tabla correspondiente representaría una arena. El segundo estrato de 5,2 Ω .m y espesor de 3,75 m representa una arcilla; finalmente el tercer estrato con 676 Ω .m representa una arena. El espesor del tercer estrato es infinito sin embargo debido a que en la superficie la separación entre electrodo de corriente y potencial (distancia a) es igual a 8 m, los resultados son válidos hasta una profundidad de investigación z de 4.15 m ($z = a*0.519$).

La profundidad de cimentación prevista en el expediente técnico es de 1.20m, y está dentro de lo previsto en la norma E.050 que indica la profundidad de desplante para cimentaciones debe ser mayor a 0.80m, nuestro estudio recomienda cimentar a 1.80m; el contratista recomendó

cimentar a 1.20 m a partir del nivel del terreno natural, nuestro estudio recomienda cimentar a 1.20m.

El costo directo promedio del mercado obtenido después de analizar las diferentes propuestas económicas emitidas por las diferentes empresas especialistas en estudio de suelos a la fecha de la presente investigación es de S/ 1100 soles (calicata, perfilaje, análisis granulométrico por tamizado y límites Atterberg para clasificación de suelos) por cada calicata. Por su parte el estudio geológico del suelo después del análisis de costos unitarios realizado es de S/75 soles por punto de sondeo.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

1. Efectuar mediciones de resistividad eléctrica en el terreno de emplazamiento de la Institución Educativa N° 60778 utilizando el Método de Wenner, permitió determinar las características geológicas y propiedades físicas de los estratos del suelo, verificándose la existencia de un alto nivel de correlación entre el corte geoelectrico y geológico y las características físicas del suelo; con lo cual la hipótesis general de la investigación ha quedado contrastada afirmativamente. Concluyéndose que el método Wenner de resistividad eléctrica es un buen método para obtener el corte geoelectrico y geológico del suelo sin necesidad de realizar excavaciones, para determinar la capa de suelo competente para la cimentación superficial de una edificación.
2. Los resultados en el terreno de emplazamiento de la Institución Educativa N° 60778 obtenidos para el corte geológico según perfiles del suelo de los estudios de prospección a través de la práctica de calicatas y determinación de perfil por el método convencional en laboratorios de Mecánica de Suelos, son idénticos en espesor de capa existe una variación de 5% y la homogeneidad e isotropía es muy similar que el corte geológico obtenido a partir de la asociación del corte geoelectrico y el corte geológico obtenido a partir de la medición de la resistividad con el empleo del Método de Wenner, con lo cual la hipótesis específica 1 ha quedado confirmada.
3. Las características físicas de los suelos determinados a partir de los ensayos de medición de resistividad eléctrica por el Método de Wenner son idénticos a los obtenidos por medición

de las características físicas a través de ensayos convencionales de métodos normalizados en los estudios de Mecánica de Suelos; quedando así confirmada la hipótesis específica 2.

4. Al comparar la eficiencia para la obtención de resultados de características de estratos y propiedades físicas y mecánicas del suelo en la Institución Educativa N° 60778, resulta que los tiempos y costos del Método de Wenner de resistividad eléctrica son menores que los empleados para su determinación por el Método convencional de la Mecánica de Suelos, siendo favorables en una relación de 8:1 y de 2:1, respectivamente; quedando de esta manera confirmada la hipótesis específica 3.

6.2. Recomendaciones

Se recomienda:

- Para suelos donde en estudios en áreas colindantes se conozca la presencia de mayor número de estratos, se debe realizar los sondeos eléctricos separando electrodos en superficie a mayor longitud para garantizar una mayor profundidad de estudio, pues de la literatura se sabe de la precisión del alcance máximo método Wenner de 12,5 m de profundidad.
- Previa a cualquier expedición en la que se utilice el método Wenner de resistividad eléctrica, contar con un mapa geológico como apoyo, de esta manera al utilizar este método en combinación con los métodos convencionales se logrará una mejor caracterización del suelo y reducción de incertidumbre.
- Usar el método Wenner de resistividad eléctrica para estudios de prospección de cortes geológicos, tipo de suelos, presencia de napa freática, capacidad de soporte y otros. Asimismo, para elaborar Términos de Referencia (TDR) para estudios definitivos de ingeniería en el área de cimentaciones superficiales. También cuando se requiera conocer las características del suelo en términos generales, cuando se requieran resultados inmediatos y se cuenten con presupuestos limitados, como es el caso de macro zonificación y micro zonificación sísmica.
- Proseguir con las investigaciones en esta línea y propender la posibilidad de incluir en la norma E.050 el método Wenner de resistividad eléctrica para caracterización de suelos como estudio complementario a los existentes.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Lavalle Oliva Carlos Alberto. 2021. Estudio comparativo de métodos de medición de la resistividad del terreno y propuesta de protocolo de medición. Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Mayo de 2021. 138 p.
2. Quispilaya Marmolejo Robinson y Cruz Chumpitaz William Jason. 2018. Propuesta del método no convencional Wenner de resistividad eléctrica para caracterización de suelos en institución educativa Libertador San Martín – Recuay 2018. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil. Universidad Privada del Norte. Facultad de Ingeniería. Carrera de Ingeniería Civil. 2018. 137 pag.
3. Cartomex. 2015. Cartomex, Soluciones geográficas para decisiones inteligentes. Recuperado el 17 de septiembre de 2020, de <https://www.cartomex.com/tomografia-electricaresistivahtml> .
4. Casas Ospina, F. 2010. Tierras, Soporte de la seguridad eléctrica (Quinta ed.). (S.E. Ltda., Ed.) Bogotá D.C., Colombia: ICONTEC.
5. Alexander, C., & Sadiku, M. (2013). Fundamentos de circuitos eléctricos. Mexico D.F.: Impresiones editoriales F.T. S.A. de C.V.
6. Angulo, W. (2017). RPP NOTICIAS. Lima. Obtenido de <https://rpp-pe.cdn.ampproject.org>.
7. Arias, D. (2011). Exploración Geotécnica - Relaciones Geoeléctricas. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
8. Arpi, F. R., & Marca, J. F. (2011). Implementación de un

instrumento para prospección Geoeléctrica mediante el Método Wenner - Offset. (Tesis de Grado). Universidad de Cuenca Facultad de ingeniería Escuela de Ingeniería eléctrica, Cuenca, Ecuador.

9. Auge, M. (2008). Métodos de Prospección Geoeléctrica. Buenos Aires, Argentina: Recuperado de <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/ProspeccGoelec.pdf>.
10. Cárdenas, V., & Galvis, G. (2011). Manual para la interpretación del perfil de resistividad obtenido al realizar el estudio de la resistividad del suelo a partir de las configuraciones del Método Wenner. (Tesis de grado). Universidad Tecnológica de Pereira Facultad de Tecnologías., Pereira, Colombia.
11. Chavarria, T. (2017). Desarrollo del contenido programático de las asignaturas "Análisis Geotécnico y cimentaciones", del departamento de Geotecnia para la incorporación en la reforma curricular de la carrera Ingeniería Civil. (Tesis de pregrado). Universidad de el Salvador, San Salvador.
12. Cobeñas, A. (2017). Aplicación del Método Geofísico-Prospección eléctrica activo para determinar la profundidad de acuíferos subterráneos en la localidad El Virrey-Olmos-Lambayeque. (Tesis de grado). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú.
13. Consenza, A. (2006). El Sondeo eléctrico vertical como metodología geofísica en el estudio de capas acuíferas en la finca El Baul Santa Lucia Cotzumalguapa. (Tesis pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
14. Cuñez Uvidia, J. A. (2015). Comportamiento de la resistividad eléctrica de los suelos ante variaciones de humedad y grado de

- compactación. (Tesis de Grado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
15. Das, B. (2012). Fundamentos de Ingeniería de cimentaciones. México D.F.: Data color impresores S.A.
16. Delgado, M. (2008). Ingeniería de Fundaciones. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería. Fierro, J., & Segarra, M. (2018). Diseño Geotécnico de la cimentación de los tanques de digestión anaeróbica para la planta de tratamiento de aguas residuales de Guangarcucho. (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
17. Gonzales, L. (2010). Ingeniería Geológica. Madrid, España: Pearson Educación S.A.
18. Graneros, A., & Tito, J. (2017). Caracterización geotécnica del suelo de la APV Ayllu Rau Rau, mediante la prueba estandar de penetración (SPT) con el cono de Peck para fines de cimentación en edificaciones 2016. (Tesis de pregrado). Universidad Andina del Cusco, Cusco, Perú.
19. Herrera, N. (2018). Evaluación de la unidad Hidrogeológica Tulcán para el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo. (Tesis pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
20. Huisa, C. (2017). Aplicación de los métodos de Resistividad Multielectrodo - Georadar y su modelización 2D para caracterizar el subsuelo en la ampliación del terminal portuario general San Martín Región Ica. (Tesis de grado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.
21. Lakubovskii, V., & Liajov, L. (1980). Exploración Eléctrica. España: Reverté S.A.

22. Jiménez, S. (2008). Elaboración de un plan de explotación de aguas subterráneas en una zona de la península de Santa Elena, mediante la interpretación de métodos resistivos. (Tesis de Grado). Escuela Superior Politécnica del litoral Facultad de Ingeniería en ciencias de la tierra, Guayaquil, Ecuador.
23. Juárez, E., & Rico, A. (2012). Mecánica de Suelos. México: Limusa S.A.
24. Lambe, T., & Whitman, R. (2013). Mecánica de suelos. México, D.F.: Limusa S.A.
25. Moreno, G., Valencia, J., Cárdenas, C., & Villa, W. (2007). Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra. Antioquia: Universidad de Antioquia.
26. Nieto Oropesa, H. D. (2007). Caracterización geoelectrica del subsuelo en los valles del Rio Mamo y quebradas Topo y Tacagua para prospeccion de aguas subterráneas. (Tesis de pregrado). Universidad Simon Bolívar, Sartenejas, Venezuela.
27. Palacios, M. (2015). Urbanizar las laderas para proteger los valles: Lurín, Lima. Obtenido de <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/investigaterritorios/article/view/13977>.
28. Peck, R., Hanson, W., & Thornburn, T. (2012). Ingeniería de Cimentaciones. México D.F.: Limusa S.A.
29. Pellicer, E. (2015). Caracterización Mediante tomografía eléctrica del deslizamiento de Toleo. (Tesis de Maestría). Universidad de Oviedo Facultad de Geología, Oviedo, España.
30. Pizarro, L. (2014). Interpretación de mediciones de resistividad de

terreno por medio de curvas patrón. (Tesis de Maestría).
Universidad Andrés Bello, Santiago de Chile.

31. PREDES. (2018). Conociendo los suelos de Moquegua. Obtenido de: <https://www.predes.org.pe/>
32. Quispe, S. (2016). Prospección Geoeléctrica de agua subterránea mediante dispositivos móviles y Arduino. (Tesis de grado). Universidad Mayor de San Andrés Facultad de ciencias puras y naturales, La Paz, Bolivia.
33. Ramírez, A. (2017). Evaluación por métodos no convencionales de caracterización de suelos del distrito de Morales, provincia de San Martín - región de San Martín. (Tesis de grado). Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú.
34. Sanz, J., Duque, E., & Gómez, S. (2010). LA RESISTIVIDAD DEL SUELO EN FUNCION DE LA FRECUENCIA. En Scientia Et Technica (en línea), XVI (44), pp. 1-2, recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84917316001>
35. Seippel, R. (2003). Fundamentos de electricidad. Sevilla, España: Reverté S.A.
36. (2010). Sistemas de Puesta a tierra: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería y arquitectura. Manizales: Blanecolor Ltda.
37. Yanque, M. (2006). Diseño de redes de puesta a tierra en subestaciones de corriente alterna. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería facultad de Ingeniería Mecánica, Lima, Perú.

ANEXOS

ANEXO 1: Resistividad de suelos, método Wenner 4 barras.

Equipos: Megger Nilsson, Metrawatt o similar

Accesorios: 4 barras, 4 cables, 1 martillo o masa, 1 cinta métrica.

1. Se revisa el terreno seleccionado. No debe haber tuberías, cables ni estructuras cercanas. No debe haber torres de alta tensión en un radio de 200 metros.
2. Se instalan las barras en una línea recta, con una separación entre cada dos barras consecutivas de 1 metro. Las barras se clavan hasta que queden firmes en el terreno.
3. Se conectan los cables, en un extremo de la barra y el otro al instrumento. Cuidado con los bornes de conexión: hay uno específico para cada barra. Siempre que sea posible utilice cables de diferentes colores para evitar errores de conexión.
4. Se efectúa la medición siguiendo el procedimiento indicado en el manual respectivo.
5. Se repite el procedimiento separando las barras dos metros entre sí.
6. Se repite el procedimiento separando las barras tres metros entre sí.
7. Se repite el procedimiento separando las barras cuatro metros entre sí.
8. Se toma nota de los valores de resistencia indicados por el instrumento.
9. Se calcula la resistividad utilizando la fórmula siguiente:

$$R = 2 \cdot R_0 \cdot \pi \cdot L$$

Dónde: R= resistividad en ohms-cm R_0 = Resistencia en Ohms
 π = constante y L = distancia entre barras en cm. Interpretación de resultados:

ANEXO 2: Características del Telurímetro o Resistivímetro

MTD 20KWe - ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

APLICACIÓN

Medición de resistencias de puesta a tierra (con 3 bornes), resistividad del suelo por el método de Wenner (con 4 bornes) y tensiones presentes en el terreno.

MÉTODO DE MEDICIÓN DE RESISTENCIA

El telurímetro inyecta en el terreno una corriente estabilizada electrónicamente (por lo que no se requieren ajustes previos a la medición), y mide con alta precisión la tensión que se desarrolla en el terreno por la circulación de esa corriente a través de la resistencia de difusión del electrodo hincado. La lectura de R es directa en el visor.

INMUNIDAD A LAS PERTURBACIONES

La frecuencia de operación cumple con la ecuación:

$$f_g = \frac{2n+1}{2} \times f_i$$

Donde:

f_g = frecuencia de la corriente generada por el telurímetro

n = número entero.

f_i = frecuencia industrial.

El cumplimiento de esta ecuación implica que la frecuencia de operación no coincide con ninguna armónica de la frecuencia industrial, lo cual permite, mediante el empleo de filtros adecuados, eliminar el efecto de las corrientes parásitas que suelen estar presentes en los terrenos estudiados.

FUNCIONAMIENTO COMO VOLTÍMETRO

En la función voltímetro, el equipo opera como voltímetro convencional de C.A. y permite verificar la presencia y medir las tensiones generadas por las corrientes parásitas.

ESCALAS DE MEDICIÓN

Resistencias: 0-20; 0-200; 0-2.000 e 0-20k Ω

Tensión: 0-200V~

EXACTITUD

Medición de resistencias: $\pm 2\%$ del valor medido $\pm 1\%$ del fondo de escala.

Medición de tensión: $\pm 2\%$ del valor medido $\pm 1\%$ del fondo de escala.

RESOLUCIÓN DE LECTURA

0,01 Ω en la medición de resistencia.

0,1V en la medición de tensión.

POTENCIA Y CORRIENTE DE SALIDA

Opera con una potencia de salida inferior a 0,5W y con una corriente inferior a 15 mA (pico a pico).

ALIMENTACIÓN

Batería recargable interna

CARGADOR DE BATERÍA

El circuito inteligente ajusta la carga de la batería a los parámetros optimizados para garantizar la máxima vida útil. Si alimenta por fuente externa para 95-240V~ (provisto con el equipo) o de una batería del automóvil de 12V.

ALARMA ACÚSTICA

Advierte al operador cuando existen anomalías en el circuito de corriente que dificultan la obtención de un resultado confiable.

TEMPERATURA DE OPERACIÓN

-10°C a 50°C

TEMPERATURA DE ALMACENAMIENTO

-25°C a 65°C

HUMEDAD

95% RH (sin condensación)

ALTURA MÁXIMA

3000m sobre el nivel del mar

PESO DEL EQUIPO

Aprox. 2,3 kg

DIMENSIONES

221 x 189 x 99mm.

ACCESORIOS INCLUIDOS

- Fuente de alimentación, para la red de 95 - 240V~
- Cable de conexión para alimentar el cargador con batería externa (automóvil o similar)
- 4 Jabalinas auxiliares de acero revestido en cobre.
- Conjunto de 4 cables de medición
- Extractores de jabalinas
- Bolsa para los accesorios
- Manual de operación

ANEXO 3: Matriz de consistencia

Título: “Resistividad eléctrica del terreno y caracterización del suelo de fundación de la institución educativa N° 60778, distrito de San Juan Bautista, provincia de Maynas, Perú 2022”.					
Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicadores	Metodología
<p>Problema General</p> <p>¿Cómo determinar, a través de los valores de resistividad eléctrica del terreno, las características físicas y mecánicas del suelo de fundación de la estructura de la Institución Educativa N° 60778, Comunidad de Nina</p>	<p>Objetivo General</p> <p>Efectuar mediciones de resistividad eléctrica en el terreno de fundación de la Institución Educativa N° 60778 utilizando el Método de Wenner, determinar la relación existente entre el corte geoelectrico y geológico, analizar las características del suelo; y, comparar los resultados con los obtenidos a partir de</p>	<p>Hipótesis General</p> <p>H: Los valores de resistividad eléctrica determinados a partir de emplazamiento en el terreno de fundación de la Institución Educativa N° 60778 utilizando el Método de Wenner, tienen alto nivel de correlación con el espesor de los estratos y las características físicas y mecánicas del</p>	<p>Variable independiente</p> <p>X:</p> <p>Resistividad Óhmica del terreno de la Institución Educativa N° 60778</p>	<p>Indicadores X</p> <p>Valores de resistividad del suelo</p>	<p>Tipo de Investigación:</p> <p>No Experimental, de tipo descriptivo comparativo.</p> <p>Diseño de Investigación:</p> <p>Esquema:</p> <div style="border: 1px solid black; width: 50px; height: 30px; margin: 10px auto; text-align: center; line-height: 30px;">M O</div> <p>Donde:</p> <p>M: Muestra</p>

<p>Rumi, distrito de San Juan Bautista, provincia de Maynas?</p> <p>Problemas específicos</p> <p>1. ¿Es posible, a través de los valores de resistividad eléctrica, obtener una relación entre un corte geoelectrico y geológico del terreno en la fundación estructural del</p>	<p>ensayos de la Mecánica de Suelos</p> <p>Objetivos Específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Obtener un corte geoelectrico y geológico del suelo a partir de los valores de resistividad eléctrica obtenidos mediante la aplicación del método de Wenner en el terreno de fundación de la Institución Educativa N° 60788. • Obtener una correlación entre los resultados del 	<p>suelo en este entorno.</p> <p>Hipótesis Específicas</p> <p>H1: Los valores de resistividad eléctrica obtenidos mediante la aplicación del método de Wenner en el terreno de emplazamiento de la Institución Educativa N° 60778 permiten asociar el corte geoelectrico y el corte geológico en esta área de terreno correspondiente.</p> <p>H2: Existe una correlación entre los</p>	<p>Variable dependiente Y:</p> <p>Características físicas del suelo</p> <p>Variable Interviniente Z:</p> <p>Propiedades mecánicas del suelo de fundación de la Institución</p>	<p>Indicadores Y</p> <p>-Espesor de estratos</p> <p>-Clasificación del suelo de cada estrato.</p> <p>-Características físicas del suelo de fundación</p> <p>Aproximación de valores de esfuerzos del suelo de fundación</p>	<p>O: Observaciones</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------

<p>local de la Institución Educativa N° 60778, Comunidad de Nina Rumi, distrito de San Juan Bautista, ¿provincia de Maynas?</p> <p>2. ¿Es posible lograr una correlación satisfactoria entre los resultados de resistividad eléctrica y los valores de las propiedades físicas y</p>	<p>Estudio de Mecánica de Suelos existente y los resultados obtenidos del empleo del Método de Wenner de resistividad eléctrica aplicado en el terreno de fundación de la Institución Educativa N° 60778.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Obtener una correlación entre los resultados del Estudio de Mecánica de Suelos existente y los resultados obtenidos por Método de Wenner de resistividad eléctrica aplicado en el terreno de fundación de la Institución Educativa N° 	<p>resultados del Estudio de Mecánica de Suelos existente y los resultados obtenidos del empleo del Método de Wenner de resistividad eléctrica aplicado en el terreno de emplazamiento de la Institución Educativa N° 60778.</p> <p>H3: Lo tiempos y costos de determinación de las características físicas y mecánicas del suelo aplicando el Método de Wenner de resistividad eléctrica son menores que los empleados para</p>	<p>Educativa N° 60778</p>		
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------	--	--

<p>mecánicas del suelo obtenidas a través de estudios geotécnicos y de la Mecánica de Suelos?</p> <p>3. ¿En qué medida resulta ventajoso el uso de medidores de resistividad eléctrica frente a los métodos geotécnicos convencionales de caracterización de suelos?</p>	<p>60778.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Comparar en tiempos y costos de ejecución la obtención de resultados tanto del Método de Wenner de resistividad eléctrica y el Método convencional de la Mecánica de Suelos para determinación de características físicas y mecánicas del suelo. 	<p>su determinación por el Método Convencional de la Mecánica de Suelos.</p>			
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------	--	--	--